

TESIS DE DOCTORADO

**APLICACIÓN DEL BALANCE
HÍDRICO EN SISTEMAS DE
RIEGO "PIVOTE CENTRAL
FIJO", CASO DEL ESTRATO
LITORAL CENTRO DE LA ZONA
CAÑERA GUATEMALTECA**

Otto René Castro Loarca

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL
PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y MEDIOAMBIENTALES

LUGO, 2018



DECLARACIÓN DO AUTOR/A DA TESE

Aplicación del balance hídrico en sistemas de riego "Pivote central fijo", caso del estrato litoral centro de la zona cañera guatemalteca

Don Otto René Castro Loarca

Presento a miña tese, seguindo o procedemento axeitado ao Regulamento, e declaro que:

- 1) A tese abarca os resultados da elaboración do meu traballo.
- 2) De selo caso, na tese faise referencia ás colaboracións que tivo este traballo.
- 3) A tese é a versión definitiva presentada para a súa defensa e coincide coa versión enviada en formato electrónico.
- 4) Confirmo que a tese non incorre en ningún tipo de plaxio doutros autores nin de traballos presentados por min para a obtención doutros títulos.

En Guatemala., 18 de enero de 2018..

Asdo. Otto René Castro Loarca

AUTORIZACIÓN DO DIRECTOR

Aplicación del balance hídrico en sistemas de riego "Pivote central fijo", caso del estrato litoral centro de la zona cañera guatemalteca

Dr. Don Xan Xosé Neira Seijo..

Dr. Don Mario Francisco Melgar Morales

INFORMA/N:

Que a presente tese, correspóndese co traballo realizado por MsC Otto René Castro Loarca, baixo a miña dirección, e autorizo a súa presentación, considerando que reúne os requisitos esixidos no Regulamento de Estudos de Doutoramento da USC, e que como director desta non incorre nas causas de abstención establecidas na Lei 40/2015.

En Guatemala, 18 de enero de 2018

Asdo. Dr. Don Xan Xosé Neira Seijo

Asdo. Dr. Don Mario Francisco Melgar
Morales

Agradecimientos

El presente estudio fue el resultado del trabajo de muchas personas que contribuyeron en la realización de las labores de campo y oficina, el cual agradezco su apoyo y su amistad. Destaco mi agradecimiento a las personas que han contribuido en un mayor tiempo como el caso del Ing. Héctor Monterroso que me apoyo técnicamente en la realización de esta tesis. A mis directores, Dr. Xan Neira, por su amistad, capacidad de trabajo y la disponibilidad mostrada a la hora de corregir y mejorar la presente tesis. Al Dr Agustín Merino por su apoyo y orientación para salir adelante en este proyecto. Al Dr. Mario Melgar por el apoyo anímico, logístico y orientación para que este trabajo culminara con éxito. A mis compañeros Ovidio Pérez, Adlai Meneses, Fredy Longo y Héctor Orozco por la convivencia y apoyo en la búsqueda de la superación profesional. A mi abuelo Fernando Castro Guzman y a mi padre, José Luis Castro Vides (que en paz descansen) y a mi madre Yolanda Estela Loarca López agradecerles su lucha para que eligiera el camino del bien. A mis hermanos José Alfredo (Motivador inicial para realizar este reto), Sandra Patricia, Dinora Azucena, Lissette Iracema y Claudia Lorena por su unidad e inspiración a seguir adelante. Merito especial a mi esposa Sandra Acosta García, a mis hijos Otto Fernando, Silvia Cristina, María Sandra y a mis seis nietos.

Contenido

I. INTRODUCCIÓN

1.1	Descripción general	1
1.2	Objetivos de la tesis	2
	1.2.1. Objetivo general	2
	1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3	Organización de la tesis	3

II REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1	El cultivo de la caña de azúcar	7
	2.1.1. Clasificación taxonómica	8
	2.1.2. Morfología de la caña de azúcar	8
	2.1.3. Etapas de desarrollo de la caña de azúcar	8
2.2	Desarrollo del cultivo de la caña de azúcar en Guatemala	13
	2.2.1. Importancia de la caña de azúcar en Guatemala	14
2.3	Características de la zona cañera guatemalteca	17
	2.3.1. Clima	18
	2.3.2. Suelos	20
	2.3.2.1. Material parental	20
	2.3.2.2. Clasificación de los suelos de la región	20
	2.3.2.3. Grupos de manejo de suelos	21
	2.3.2.4. Zonificación agroecológica (ZAE)	23
2.4	El riego	26
	2.4.1. Importancia	26
	2.4.2. Realidad mundial	27
	2.4.3. Expansión mundial	28
	2.4.4. Desarrollo del riego	28
	2.4.5. Desarrollo y realidad del riego en Guatemala	29
2.5	El riego en caña de azúcar	30
	2.5.1. Características fisiológicas a ser consideradas para un manejo eficiente del agua	31
2.6	El riego en la zona cañera guatemalteca	32
	2.6.1. El manejo del recurso hídrico en la actividad del riego zona cañera guatemalteca	32
	2.6.1.1. Fuentes de agua utilizadas y su disponibilidad	33
	2.6.1.2. Oferta y demanda del recurso hídrico	34
	2.6.2. Época y tipos de riego	36
	2.6.3. Métodos y sistemas de riego utilizados	37
	2.6.4. Evolución de los métodos y sistemas de riego	38
	2.6.5. Visualización del riego para el 2020	39
2.7	Los sistemas de riego de pivotes fijos	41
	2.7.1. Origen y evolución del sistema de los pivotes fijos	41
	2.7.2. Características del sistema pivote fijo	42
	2.7.3. Emisores	43
	2.7.4. Los sistemas de riego pivote en la zona cañera de Guatemala	44

2.8	La labor del Centro guatemalteco de Investigación y Capacitación de la caña de azúcar (Cengicaña).	45
2.9	El balance hídrico como un modelo para gobernar el riego a nivel de parcela	47
2.9.1.	Formulación del Balance Hídrico general	48
2.9.2.	Determinación de los términos del Balance Hídrico en general	49
2.9.3.	Aplicación del Balance Hídrico para estimar los consumos de agua de los cultivos	51
2.9.4.	La aplicación del balance hídrico en caña de azúcar	52
2.9.5.	Cálculo del balance hídrico diario/semanal en las regiones cañeras	53
2.9.6.	Uso del Balance Hídrico en sistemas pivote fijos.	56
2.9.7.	Software existente en caña de azúcar para la planificación, ejecución y evaluación del riego.	57

III. MATERIALES Y METODOS

3.1	Esquema general de trabajo	64
3.2	Cálculo de los índices de calidad (uniformidad y eficiencia) en los sistemas de riego “pivote fijo”	64
3.3	Análisis de los factores atmosféricos que afectan el requerimiento de agua en la latitud 14°N 90°O.	70
3.4	3.4. Elaboración del software Cengirriegos (SC)	72
3.4.1.	Fundamentos que definieron la creación del SC	72
3.4.2.	Módulos del SC	74
3.4.2.1.	El modulo Riegos	74
3.4.2.2.	El módulo Agrometeorología	75
3.4.3.	La metodología del balance hídrico a utilizar	76
3.4.4.	El SC (Materiales, estrategias y métodos que se utilizaron para la elaboración)	76
3.4.5.	Características generales para la aplicación del SC	77
3.4.5.1.	Alcance y requisitos del SC en cuanto a su utilización	77
3.4.6.	Modelo de operación del SC	77
3.4.7.	Manejo de la información para los usuarios del SC	79
3.4.8.	Acciones que se deben tomar para la decisión de regar según el abatimiento de la humedad en el suelo	80
3.4.8.1.	Cuando en el lote la actividad de riego se realiza normalmente y no existen aportes adicionales en el balance	81
3.4.8.2.	Cuando en el lote la actividad de riego se realiza normalmente y existen aportes adicionales en el balance	81
3.4.9.	Manejo administrativo general del SC	82

3.5.	Metodología para la documentación y validación del SC	83
3.5.1.	¿Cómo se documentará y se validará el SC?	84
3.6.	Metodología para definir estrategias técnicas para divulgar, manejar, lograr la adopción y capacitación del SC	85
3.6.1.	El manejo del SC	86
3.6.2.	Adopción y capacitación del personal técnico para usar el SC	86

IV. RESULTADOS

4.1	Índices de calidad de operación de los sistemas de riego pivote fijo en funcionamiento	88
4.1.1.	Uniformidad del riego	89
4.1.2.	Eficiencia del riego	89
4.2	Factores atmosféricos que afectan el requerimiento de agua en la latitud 14°N 90°O	95
4.2.1.	Demanda climática (ETO)	95
4.2.1.1.	Comportamiento de la energía solar que llega al límite de la atmósfera según ubicación latitudinal.	96
4.2.1.2.	Comportamiento de la energía solar global que llega a la superficie terrestre	98
4.2.1.3.	Efectos en la demanda climática (ETO) a causa del fenómeno natural ENSO	99
4.2.1.4.	Propuesta técnica para el ahorro de agua en sistemas “pivote fijo”	102
4.3	Software Cengirriegos (SC)	104
4.3.1.	Ingreso al sitio SC	104
4.3.2.	Ingreso de usuario	104
4.3.3.	Operación del SC	105
4.3.3.1.	Inicio	105
4.3.3.2.	Módulo riegos	106
4.3.3.3.	Módulo de agrometeorología	119
4.3.4.	Documentación de la aplicación del SC	119
4.3.4.1.	Estudio del déficit hídrico con balance hídrico (Análisis retrospectivo)	119
4.3.4.2.	Planificación y ajuste de frecuencias, tiempos y láminas en los diferentes sistemas de riego	123
4.3.4.3.	Manejo del balance hídrico en tratamientos a nivel experimental	125
4.3.5.	Impacto del uso del balance hídrico en la economía y sostenibilidad del recurso hídrico	128
4.3.6.	Estrategias técnicas utilizadas para divulgar, manejar, lograr la adopción y capacitación del SC	129
4.3.6.1.	Divulgación del SC	129

4.3.6.2. Manejo técnico y efecto multiplicador esperado del SC	130
V. CONCLUSIONES	133
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
ANEXOS	
I	145
II	154
III	167



Índice de figuras

II REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

No. figura	Nombre	Página
Fig. 2.1	Países productores de caña de azúcar en el mundo. Melgar, M. (2010).	7
Fig. 2.2	Raíces de la Caña de azúcar. Subiros, (2000).	9
Fig. 2.3	Formación de tallos en la etapa de macollamiento en caña de azúcar. Subiros, (2000).	10
Fig. 2.4	Estructura de la vaina de una hoja. Subiros, (2000).	11
Fig. 2.5	Ingenios activos de la agroindustria azucarera de Guatemala. Asazgua, (2017).	14
Fig. 2.6	% de producción para el consumo interno y la exportación 2001-02/2015-16. Agroindustria cañera de Guatemala. Asazgua, (2017).	15
Fig. 2.7	Productos de la sacarosa de potencial importancia.	17
Fig. 2.8	Ubicación geográfica de la Zona Cañera de la costa sur de Guatemala. Datum horizontal WGS84. Fuente mapa base: Mapa de Cobertura de Uso del Suelo y Uso de la Tierra, escala 1:50,000. 2006. MAGA-UPGGR. Actualizado 2008. Braulio Villatoro. SIAP-Cengicaña.	18
Fig. 2.9	Estratos altitudinales de la Zona Cañera Datum horizontal WGS84. Fuente mapa base: Mapa de Cobertura de Uso del Suelo y Uso de la Tierra, escala 1:50,000. 2006. MAGA-UPGGR. Actualizado 2008. Braulio Villatoro. SIAP-Cengicaña.	19
Fig. 2.10	Mapa de clasificación de suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. Fuente: SIAP-Cengicaña.	21
Fig. 2.11	Grupos de manejo de suelos de la zona cañera de la costa sur de Guatemala.	22
Fig. 2.12	Zonificación agroecológica de la zona cañera guatemalteca.	24
Fig. 2.13	Las regiones de la zona cañera y su interrelación con las cuencas hidrográficas de la zona cañera guatemalteca.	25
Fig. 2.14	Área física sembrada de caña y su interrelación con las cuencas hidrográficas ubicadas en la zona cañera guatemalteca. Castro L, O. (2016).	26
Fig. 2.15	Evolución de la superficie del riego en la región latinoamericana (1961:1997).	29
Fig. 2.16	Superficie de riego por cultivos en Guatemala en 1997.	30
Fig. 2.17	Área de riego en los principales productores de caña en el mundo.	31
Fig. 2.18	Crecimiento del riego en la zona cañera guatemalteca.	32
Fig. 2.19	Uso de fuentes de agua en la zona cañera de Guatemala.	34
Fig. 2.20	Uso del agua a nivel de parcela y escenarios para el 2020 en la zona cañera guatemalteca.	35
Fig. 2.21	La interacción entre épocas y tipos de riego en cada uno de	36

	los estratos de la zona cañera guatemalteca.	
Fig. 2.22	Porcentajes de aplicación y la importancia de los tipos de riego que se realizan en la zona cañera de Guatemala.	37
Fig. 2.23	Sistemas presurizados que se utilizan en cada uno de los ingenios de la agroindustria azucarera guatemalteca.	38
Fig. 2.24	Evolución de los métodos y sistemas de riego en la zona cañera de Guatemala	39
Fig. 2.25	Visualización del uso de métodos y sistemas de riego para el 2020 en la zona cañera guatemalteca.	40
Fig. 2.26	Esquema de las diferentes partes que componen un sistema pivote: 1) Tubería de alimentación; 2) centro del pivote; 3) tubería porta-emisores o tramo; 4) torre; 5) elementos de soporte (RKD, 2005).	43
Fig. 2.27	Crecimiento del área bajo riego 2001-2010, por estrato altitudinal bajo (1-100 msnm), medio (100-300 msnm) y alto (más de 300 msnm) Fuente: CENGICANÁ 2011. Situación actual y proyección de la producción de azúcar Zafra 2010/2011. Presentación en Power Point a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.	46
Fig. 2.28	Evolución de la eficiencia en riego Fuente: CENGICANÁ 2011. “Situación actual y proyección de la producción de azúcar” Zafra 2010/2011. Presentación en Power Point a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.	47
Fig. 2.29	Esquema de los términos del balance hídrico de la zona de enraizamiento (Pereira, 2010).	49

III. MATERIALES Y METODOS

No. figura	Nombre	Página
Fig. 3.1	Esquema secuencial de cumplimiento de los objetivos para llegar a la aplicación del balance hídrico en el suelo con sistemas de riego "pivote fijo", caso de la zona cañera guatemalteca.	64
Fig. 3.2	Caracterización de los pivotes ubicados en la zona cañera guatemalteca zafra 2014-2015. Castro L. O. (2015)	65
Fig. 3.3	Ubicación de la zona cañera guatemalteca de donde se realizaron los ensayos de uniformidad y eficiencia.	66
Fig. 3.4	Colocación de los pluviómetros a lo largo del radio del pivote fijo.	67
Fig. 3.5	Colocación de pluviómetros en las calles donde se dividen los lotes.	68
Fig. 3.6	Entradas y salidas del programa DEPIVOT en el módulo de evaluación de sistemas ya en funcionamiento.	68
Fig. 3.7	Ventana para la introducción de los datos referentes a los pluviómetros en la evaluación de sistemas en	69

funcionamiento. Valín M. I., (2006).

Fig. 3.8	Curva de distribución de frecuencias adimensional, Tarjuelo J. M., (1999).	70
Fig. 3.9	Modelo de definición de la demanda climática a través de la estimación de la ETo por Penman Monteith. Serie riego y drenaje #56. FAO (2006).	71
Fig. 3.10	Influencia actual de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona cañera guatemalteca. Fuente: Braulio Villatoro y O. Castro L. SIAP-Cengicaña.	72
Fig. 3.11	Modelo de operación del Software Cengirriegos (SC).	79
Fig. 3.12	. Modelo sobre el manejo de la información para usuarios de SC.	80
Fig. 3.13	Acción normal sin ajustes en la toma de decisión del riego a través del uso del Balance hídrico.	81
Fig. 3.14	Acción de ajuste por incremento de la humedad en el suelo in situ en la toma de decisión del riego a través del uso del Balance hídrico.	82
Fig. 3.15	Manejo administrativo general del SC de la zona cañera guatemalteca.	83
Fig. 3.16	Aplicaciones más importantes que se pueden realizar con el SC de los tres módulos disponibles para la zona cañera guatemalteca.	84

IV. RESULTADOS

No. figura	Nombre	Página
Fig. 4.1	Curvas de distribución de frecuencia adimensional de dos sistemas pivote central que operan en la zona cañera guatemalteca.	94
Fig. 4.2	Radiación solar al límite de la atmósfera que llega en el año en diferentes zonas cañeras ubicadas en el Norte, Centro y Sur América.	96
Fig. 4.3	Energía solar potencial al límite de la atmósfera y energía potencial en la tierra en cada uno de los meses del año en la latitud 14°.	98
Fig. 4.4	Energía solar potencial al límite de la tierra en la latitud 14° durante el período de riego que va del 15 de noviembre al 15 de mayo, zona cañera guatemalteca.	98
Fig. 4.5	Comportamiento en relación a la energía potencial que llega a la superficie terrestre (días despejados) y la ETo en la latitud 14°. Ejemplo de comportamiento de la ETo en el período de riego 2008/09.	99
Fig. 4.6	Efectos del ENSO en los meses críticos marzo-abril para la relación: Radiación solar y ETo. ENSO cálido 2010 (color anaranjado) y ENSO frío 2011 (color celeste) datos de la estación meteorológica “Bonanza” ubicada en el estrato litoral a 29 msnm.	100
Fig. 4.7	El efecto de la velocidad del viento en la ETo (Estimado con	101

	Penman-Monteith). Ejemplo de lo ocurrido en febrero 2,009 (incremento del viento causado por un frente frío en un período ENSO frío), latitud 14°N longitud 90°O.	
Fig. 4.8	Comportamiento del requerimiento de agua (ETo Penman Monteith) en el período de lluvia en el estrato litoral, de la latitud 14°N longitud 90°O, caso de los años 2010 (ENSO frío) y 2012 (ENSO neutro), registros de la estación meteorológica “San Antonio El Valle” ubicado en el estrato litoral a 10 msnm.	101
Fig. 4.9	Requerimiento de agua máximo (Definida a través de la estimación de la ETo por Penman-Monteith) que se propone con fines de planificación del riego según tercio de zafra en la latitud 14°N longitud 90°O.	103
Fig. 4.10	Solicitud de registro para ingresar a Cengirriegos. Fuente Cengicaña, 2016.	104
Fig. 4.11	Página de Ingreso de usuario, Cengirriegos. Fuente Cengicaña 2016	105
Fig. 4.12	Ventana de inicio donde se muestra el esquema general de operación del SC.	106
Fig. 4.13	Ingreso al módulo de riegos en el SC.	107
Fig. 4.14	Matriz para importar características de caña de azúcar a través de Excel en el SC	108
Fig. 4.15	Matriz para importar actualizaciones de caña de azúcar a través de Excel en el SC.	108
Fig. 4.16	Matriz para importar características de suelos a través de Excel en el SC.	109
Fig. 4.17	Matriz para importar información de eventos de riego, lluvia y ajustes de humedad a través de Excel en el SC.	109
Fig. 4.18	Matriz para importar información de eventos de lluvia según influencia del pluviómetro manual a través de Excel en el SC.	106
Fig. 4.19	Opciones de consulta de lotes en el SC.	111
Fig. 4.20	Despliegue de edición por lote del componente caña de azúcar. SC.	112
Fig. 4.21	Despliegue de edición por lote del componente suelo. SC.	112
Fig. 4.22	Despliegue de edición por lote del componente riego, lluvia y ajuste de humedad. SC.	113
Fig. 4.23	Despliegue de gráficos de resultados del Balance Hídrico (BH-CENGI-MT) de la tecnología actual. SC, 2016.	114
Fig. 4.24	Despliegue de gráficos de resultados del Balance Hídrico (BH-CENGI-MT) del requerimiento real. SC, 2016.	115
Fig. 4.25	Despliegue gráfico de resultados de la evapotranspiración de un cultivo de referencia estimada por Penman Monteith (ETo) y la Evapotranspiración máxima del cultivo (ETm) en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar. SC, 2016.	116
Fig. 4.26	Despliegue gráfico de resultados de la radiación global en	116

	cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar. SC, 2016.	
Fig. 4.27	Despliegue del informe sobre la condición de humedad por lote que cubre el equipo de riego en el Software SC, 2016.	117
Fig. 2.28	Gráfico de ¿Cómo? interpretar la condición de la humedad en el suelo estimada por BH-CENGI-MT . SC, 2016.	118
Fig. 4.29	Despliegue de un plan de riego por lote propuesta que se realiza con base a la relación: Agua, suelo, caña de azúcar, atmósfera y operación. SC, 2016.	118
Fig. 4.30	Despliegue de análisis agrometeorológico que se realiza durante todo el ciclo de cultivo de la caña de azúcar. SC, 2016.	119
Fig. 4.31	Análisis gráfico comparativo del balance hídrico (BH-CENGI-MT) de la operación actual y controlada con pivote central móvil, temporada 2,012/2,013 en condiciones de un suelo con veta arenosa de la finca “El Retiro”, Ingenio Madre Tierra. (Figura elaborada con el SC).	120
Fig. 4.32	Análisis gráfico comparativo del balance hídrico (BH-CENGI-MT) de la operación actual y controlada con pivote central móvil, temporada 2,012/13 en condiciones de un suelo sin veta arenosa de la finca “El Retiro”, Ingenio Madre Tierra. (Figura elaborada con el SC, 2016).	121
Fig. 4.33	Comportamiento de la demanda climática (ET _o) y demanda de agua del cultivo ET _m (ET _o *K _c) temporada 2,012/13 en condiciones de la finca “El Retiro, Ingenio Madre Tierra. (Figura elaborada con el SC, 2016).	122
Fig. 4.34	El comportamiento de la radiación global promedio (MJ/m ² /día) en condiciones de la finca “El Retiro”, Ingenio Madre Tierra. (Figura elaborada con el SC, 2016).	123
Fig.4.35	(A) Manejo de frecuencia con balance hídrico (B) Sin manejo de frecuencia. Pivote Central Fijo de finca Cantoira, estrato litoral del ingenio Madre Tierra. SC, 2016.	124
Fig.4.36	Toneladas de caña por hectárea (TCH) obtenidas cuando se realizaron ajustes en la frecuencia de riego con balance hídrico. Pivote Central Fijo de finca Cantoira, estrato litoral del ingenio Madre Tierra.	125
Fig. 4.37	Aplicaciones del Balance Hídrico en ensayos de riegos: El riego comercial versus tecnología integrada que incluye el uso del Balance Hídrico en el período de enero a mayo 2016, finca “La Prosperidad”, ingenio Santa Ana. Figura elaborada con el SC.	126
Fig. 4.38	Imagen satelital Landsat 8-NDVI, del ensayo ubicado en la finca “La Prosperidad”, ingenio Santa Ana en el período de enero a mayo del 2016.	127
Fig. 4.39	Seguimiento de tratamientos en ensayos de riego aplicando	127

	balance hídrico en condiciones de suelo arenoso de la finca “Santa Cristina”, ingenio Magdalena. Figura elaborada con el SC.	
Fig. 4.40	Impacto económico y sostenibilidad por el uso del balance hídrico en sistemas mecanizados (pivotes y frontales) en áreas de textura franco arenosa en la industria azucarera guatemalteca.	128
Fig. 4.41	Esquema de estrategias del Manejo técnico de SC y el desarrollo del efecto multiplicador en la zona cañera guatemalteca.	131

Índice de tablas

No. tabla	Nombre	Página
Tabla 2.2	Tabla 2.2. Características climáticas en la zona cañera guatemalteca	19
Tabla 2.3	En la Tabla 2.3, Relación del grupo de manejo del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua. Fuente: B. Villatoro, 2017.	23
Tabla 3.1	Capacidad de los suelos de retener humedad según texturas. Zona cañera guatemalteca. Fuente: Laboratorio de suelos de Cengicaña, 2012.	74
Tabla 4.1	Tabla 4.1. Resultados de las evaluaciones de campo en el periodo de zafra 2014/15. Estrato medio de la zona cañera guatemalteca	90
Tabla 4.2	Tabla 4.2. Resultados de las evaluaciones de campo en el periodo de zafra 2014/15. Estrato bajo de la zona cañera guatemalteca	91
Tabla 4.3	Tabla 4.3. Resultados de las evaluaciones de campo en el periodo de zafra 2014/15. Estrato litoral de la zona cañera guatemalteca.	92
Tabla 4.4	Tabla 4.4. Resultados de las evaluaciones de campo en el periodo de zafra 2014/15. Estrato litoral de la zona cañera guatemalteca.	93
Tabla 4.5	Tabla 4.5. Acciones a seguir para mejorar el Coeficiente de uniformidad (%CU) basado en los problemas encontrados en la operación de sistemas pivote central en la zona cañera guatemalteca	94
Tabla 4.6	Tabla 4.6. Despliegue de Tabla resumen BH-CENGI-MT, que genera una comparación del balance hídrico con la tecnología actual y requerimiento real. SC, 2016.	115
Tabla 4.7	Tabla 4.7. Presentación del Software “Cengiriegos” a diferentes ingenios azucareros de la zona cañera guatemalteca.	130

Resumen

El presente trabajo de tesis se realizó en la zona cañera guatemalteca que ocupa un área de 263,000 ha, se ubica en la latitud 14°N y longitud 90°O con el fin de implementar el balance hídrico como una herramienta importante para la optimización del uso del agua con los sistemas de riego “pivote fijo”, necesaria para minimizar conflictos internos y externos derivados de la competencia en el uso del agua.

Para tal fin se desarrolló un Software práctico, dinámico y amigable para aplicar el balance hídrico basado en la relación agua-suelo-caña de azúcar-clima-operación del sistema de riego, previo al software se estudió la demanda climática (ET_o) con la metodología propuesta por series riego y drenaje 56, FAO (2006), también se evaluó la calidad del riego del sistema “pivote fijo”, con la metodología propuesta por Tarjuelo J.M, (1999) y su análisis e interpretación de datos con el programa DEPIVOT presentado en la Universidad de Compostela por Valín M.I. (2006).

El Software se le denominó Cengirriegos que además del balance hídrico analiza el comportamiento de las variables meteorológicas según fecha de siembra o corte de la caña de azúcar: lluvia, radiación global, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y la ET_o Penman-Monteith.

Adicionalmente, se analizó los usos que le han dado los usuarios al software Cengirriegos en las zafras 2013/14 y 2014/15 (período experimental), con los sistemas de riego representativos de la zona cañera guatemalteca, enfocados al ahorro de agua y energía.

También se propusieron estrategias técnicas para divulgar, manejar, lograr la adopción y capacitar al personal técnico operativo de los ingenios asociados que dispongan sistemas pivotes fijos, en la utilización del Software Cengirriegos.

Resumo

O presente traballo de tese realizouse na zona canaveira guatemalteca que ocupa unha área de 263,000 ha, sitúase na latitude 14° N e lonxitude 90° O, co fin de poñer a punto o balance hídrico como unha ferramenta importante para a optimización do uso da auga cos sistemas de rega “pivote fixo”, necesaria para minimizar conflitos internos e externos derivados da competencia no uso da auga.

Para tal fin desenvolveuse un Software práctico, dinámico e amigable para aplicar o balance hídrico baseado na relación auga-solo-cana de azucre-clima- operación do sistema de rega. Previo ao software estudouse a demanda climática (ET_o) coa metodoloxía proposta por series rego e drenaxe 56, FAO (2006), tamén se avaliou a calidade da rega do sistema “pivote fixo”, coa metodoloxía proposta por Tarjuelo J. M, (1999) e a súa análise e interpretación de datos co programa DEPIVOT presentado na Universidade de Compostela por Valín M.I. (2006).

O Software denominóuselle Cengirriegos que ademais do balance hídrico analiza o comportamento das variables meteorolóxicas segundo data de sementeira ou corte da cana de azucre: choiva, radiación global, temperatura, humidade relativa, velocidade do vento e a ET_o Penman- Monteith.

Adicionalmente, analizouse os usos que lle deron os usuarios ao software Cengirriegos nas zafra 2013/14 e 2014/15 (período experimental), cos sistemas de rega representativos da zona canaveira guatemalteca, enfocados ao aforro de auga e enerxía.

Tamén se propuxeron estratexias técnicas para divulgar, manexar, acadar a adopción e capacitar ao persoal técnico operativo dos enxeños asociados que dispoñan sistemas pivotes fixos, na utilización do Software Cengirriegos.

Abstract

The present thesis work was carried out in the Guatemalan sugarcane area that occupies an area of 263,000 ha, is located at latitude 14 ° N and longitude 90°O in order to implement the water balance as an important tool for the optimization of water use with irrigation systems "fixed pivot", necessary to minimize internal and external conflicts arising from competition in the use of water.

For this purpose, a practical, dynamic and user-friendly software was developed to apply the water balance based on the water-soil-sugarcane-climate-operation relationship of the irrigation system, prior to the software the climatic demand (ET_o) was studied with the methodology proposed by irrigation and drainage series 56, FAO (2006), the irrigation quality of the "fixed pivot" system was also evaluated, with the methodology proposed by Tarjuelo JM, (1999) and its analysis and interpretation of data with the DEPIVOT program presented at the University of Compostela by Valín M.I. (2006).

The Software was called Cengiriegos that, in addition to the water balance, analyzes the behavior of the meteorological variables according to date of sowing or cutting of the sugarcane: rain, global radiation, temperature, relative humidity, wind speed and the Penman-Monteith ET_o.

Additionally, we analyzed the uses that users have given to the software Cengiriegos in the harvests 2013/14 and 2014/15 (experimental period), with irrigation systems representative of the Guatemalan sugarcane area, focused on saving water and energy.

Technical strategies were also proposed to disclose, manage, achieve adoption and train operational technical personnel of the associated mills that have fixed pivot systems, in the use of the Cengiriegos Software.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Guatemala es un país centroamericano entre los océanos Atlántico, al Norte, y Pacífico, al Sur. El cultivo de la caña de azúcar es muy significativo en el país, la zona cañera guatemalteca se ubica en la latitud 14° N y la longitud 90° O en la zona sur guatemalteca, lindando con el Pacífico. Ocupa un área de 263,000 ha, de las cuales 180,357 ha son administradas por los 10 ingenios que están asociados al Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (Cengicaña), que fue creado por la Asociación de Azucareros de Guatemala, en 1992, para apoyar el avance tecnológico de la agroindustria azucarera.

El área cañera está dividida, desde el punto de vista productivo, en cuatro estratos, referidos a su altura sobre el nivel del mar: alto, medio, bajo y litoral. El 73 % del área sembrada se encuentra en el estrato bajo y litoral.

El cultivo de caña de azúcar, en la zona referida, es irrigado y su aplicación se realiza normalmente entre el 15 de noviembre y el 15 de mayo, período seco que coincide con la zafra (cosecha de la caña de azúcar). Sin embargo, la magnitud y duración de este período seco es variable en cada uno de los estratos altitudinales de la zona y en cada uno de los años, siendo el estrato litoral (de 0 a 40 msnm) el más seco y en el que se presentan períodos en el ciclo de cultivo, con muchas irregularidades en el comportamiento de la lluvia en el período de invierno que, en nuestra latitud, se refiere al período de lluvia.

La actual tecnología del riego está basada en aplicar una pauta de riego con la misma lámina, tiempo y frecuencia en todo ese período seco y con la misma dosis, independientemente del año, los denominados calendarios medios de riego. La variabilidad de precipitación interanual referida en la zona cañera guatemalteca aconseja adoptar otros criterios, como el establecer la pauta de riego con los datos del año en curso y no con datos medios.

Basado en los resultados de investigación realizados por Cengicaña, la práctica del riego es rentable en pre y post-corte, principalmente, en las áreas donde predomina la textura arenosa y/o arcillosa. En la actualidad el riego se aplica en el 87% del área, constituye una inversión obligada, que alcanza un gasto equivalente al 30-40 % del costo total que se utiliza para la producción de caña de azúcar en la costa sur de Guatemala.

Entre la problemática asociada al regadío en esta zona destacan, principalmente, los conflictos internos y externos derivados de la competencia en el uso del agua, aunado a los problemas referidos de irregularidades de las lluvias, principalmente en los años donde incide el fenómeno ENSO en su fase cálida (El Niño), que generan mermas en la producción a causa del incremento de la evapotranspiración (ETo) y reducción significativa de la lluvia, hecho que genera déficit hídrico.

En virtud de estas circunstancias se estima que existe una sólida base que permita mejorar los parámetros de calidad asociados al regadío. Para lograrlo se está implantando la utilización de sistemas de riego a presión, como el pivote fijo, que se caracterizan por su uniformidad de distribución, en condiciones normales mayor a 80 %, y por aplicar el agua precisa en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar. Se pretende con estas actuaciones el ahorro de agua y energía y el incremento de una mayor conciencia ambiental para lograr la optimización del uso del agua.

1.2. OBJETIVOS DE LA TESIS

1.2.1. Objetivo general

Aplicar el método del balance hídrico, entendido como el equilibrio de los recursos hídricos entrantes y salientes del sistema, para el gobierno de la irrigación. Integrando, a la vez, el uso de herramientas de control y verificación de la humedad en el suelo e instrumentos de automatización adecuados, incluido el software necesario, para determinar las disponibilidades de agua de una zona en un periodo concreto, asociado al sistema de riego mecanizado “pivote fijo” en caña de azúcar (*Saccharum spp.*), bajo las condiciones de la zona cañera de Guatemala.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Determinar los índices de calidad (uniformidad y eficiencia) de los sistemas de riego “pivote fijo” en zonas representativas de la zona cañera guatemalteca.

2. Analizar los factores atmosféricos que inciden en el comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en la latitud 14° N y longitud 90° O, base para la determinación del requerimiento de agua en caña de azúcar.
3. Establecer propuestas técnicas para mejorar la calidad del riego mediante la aplicación del balance hídrico en los sistemas de riego a presión pivotes fijos, como herramienta para la optimización del uso del agua.
4. Desarrollar un software práctico, dinámico y amigable para aplicar el balance hídrico en el suelo (Cengirriegos), adaptado al cultivo de la caña de azúcar a través del sistema pivote central fijo.
5. Analizar los usos que le han dado los usuarios al software Cengirriegos en las zafra 2013/14 y 2014/15 (período experimental), en los sistemas de riego representativos de la zona cañera guatemalteca, enfocados al ahorro de agua y energía.
6. Proponer estrategias técnicas para divulgar, manejar, lograr la adopción y capacitar al personal técnico operativo de los ingenios asociados que dispongan sistemas pivotes fijos, en la utilización del software Cengirriegos.

1.3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El presente trabajo ha sido dividido en seis capítulos, siguiendo una secuencia lógica que explique el tema objeto de estudio y el modelo creado para su diseño y evaluación.

En el capítulo I se describe, de manera general, la zona cañera guatemalteca, los objetivos de la tesis y organización de la misma.

En el capítulo II, se realiza una amplia recopilación de información y revisión bibliográfica referente al cultivo de la caña de azúcar, en Guatemala, las características de la zona cañera guatemalteca, el riego en general como una labor importante, el riego en caña de azúcar y el riego en la zona cañera guatemalteca. Así mismo, los sistemas de riego de pivotes fijos, su origen y evolución y características. De forma específica, los sistemas de riego pivote en la zona cañera de Guatemala, una descripción de la labor del Centro guatemalteco de investigación y capacitación de la caña de azúcar (CENGICANÁ). Finalmente, relativo al balance hídrico como un método para gobernar el riego, ¿Cómo se formula?, entre otros, la aplicación del balance hídrico en caña de azúcar y de forma específica y el uso en sistemas pivotes fijos.

En el capítulo III se presenta la metodología base para el cumplimiento de cada uno de los cometidos indicados en el capítulo II. Cuestiones como la base técnica y métodos para calcular los índices de calidad (uniformidad y eficiencia) de operación de los sistemas pivotes fijos en funcionamiento. También la metodología para la determinación del requerimiento de agua en la latitud 14° N longitud 90° O y la definición de las recomendaciones importantes para su utilización en los pivotes fijos. Por otro lado, los materiales y métodos para desarrollar un software práctico, dinámico y amigable que permita dar seguimiento a la planificación del riego y su comparación con las necesidades hídricas reales, denominado Cengirriegos, además, las estrategias para validar y documentar los resultados obtenidos del software a nivel de campo y estrategias técnicas para divulgar, manejar y capacitar al personal técnico operativo de la zona cañera guatemalteca.

En el capítulo IV, se presentan los resultados de las evaluaciones de campo, tales como: índices de calidad del riego en los sistemas pivotes fijos y las recomendaciones técnicas para la mejora de los sistemas pivote. También, se indican los resultados de la implementación del software elaborado, basado en información de la relación: agua-suelo-caña de azúcar-atmósfera-operación del pivote fijo, los resultados del análisis de los usos a nivel de campo sobre la aplicación del software, así mismo, la divulgación, el manejo y capacitaciones realizadas en la utilización del mismo.

En el capítulo V, se detallan las conclusiones finales del trabajo y la definición de algunas líneas de investigación futura en este campo.

II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA





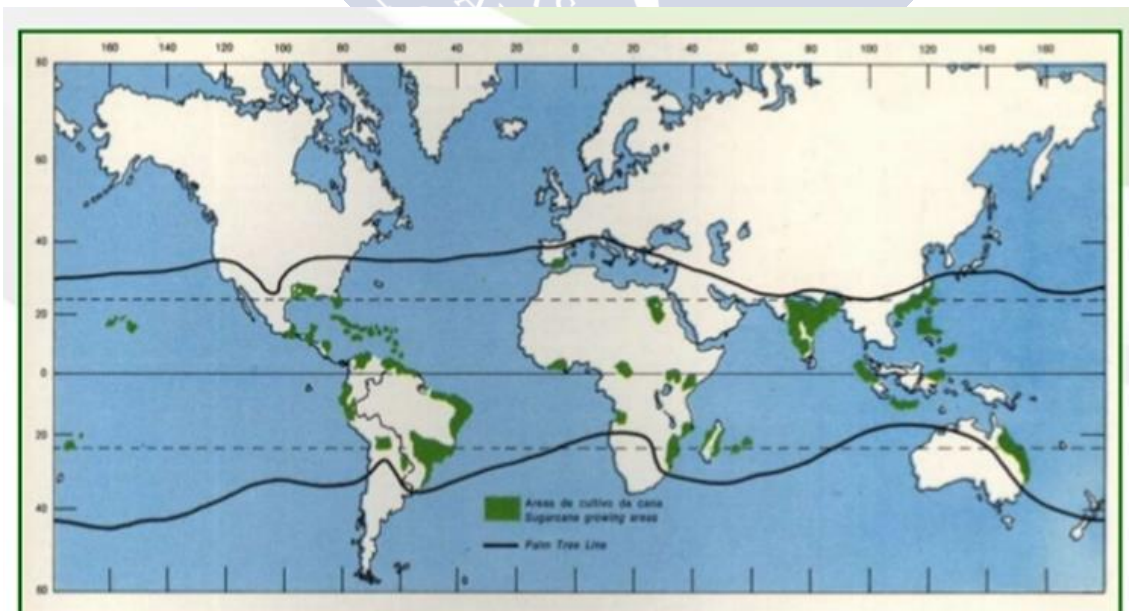
II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1. EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Saccharum officinarum, habitualmente conocida como caña de azúcar o simplemente caña, es una planta perteneciente a la familia de las poáceas, proveniente del sureste asiático y Nueva Guinea. La expansión musulmana supuso la introducción de la planta en territorios donde hasta entonces no se cultivaba. Así llegó al continente europeo, más en concreto a la zona costera de las ciudades de Málaga y Motril, siendo esta franja la única zona de Europa donde arraigó. Posteriormente los españoles llevaron la planta, primero a las islas Canarias, y luego a América. Se dice que la primera que se llevó a América fue por Pedro de Atienza, en el segundo viaje de Colón a la Isla Española. Así, este cultivo se desarrolló en países como El Salvador, Cuba, Guatemala, Brasil, México, Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador, República Dominicana, Colombia y Venezuela, que se encuentran entre los mayores productores de azúcar del mundo.

https://es.wikipedia.org/wiki/Saccharum_officinarum

Los países productores de caña de azúcar del mundo están ubicados entre los 36.7° de latitud Norte y 31.0° al Sur del ecuador extendiéndose desde zonas tropicales a subtropicales (Figura 2.1).



Source: Ometto, J.C.

+ 100 países
+ 20 millones has
1,300 millones TM azúcar

Figura 2.1. Países productores de caña de azúcar en el mundo. Melgar M. (2010)

2.1.1. Clasificación taxonómica de la caña de azúcar

La clasificación taxonómica de la caña de azúcar es la siguiente, Subiros, (1995):

REINO	Vegetal
SUBREINO	Embryobionta
DIVISION	Embryophita siphonogama
SUBDIVISIÓN	Angiospermae
CLASE	Monocotyledoneae
ORDEN	Glumiflorae
FAMILIA	Gramineae
TRIBU	Andropogonae
SUBTRIBU	Saccharae
GENERO	Saccharum

2.1.2. Morfología de la caña de azúcar

Las características morfológicas de la caña de azúcar, Cengicaña, (1995) se describen a continuación.

La raíz, Constituye el anclaje de la planta y el medio para la absorción de nutrimentos y de agua del suelo (ver Figura 2.2). Está formado por dos tipos de raíces:

1. Raíces de la estaca original o primordial se originan a partir de la banda de primordios radical, localizada en el anillo de crecimiento del trozo original (estaca) que se planta o siembra. Son delgadas, muy ramificadas y su periodo de vida llega hasta el momento en que aparecen las raíces en los nuevos brotes, lo cual ocurre entre los dos y tres meses de edad.
2. Las raíces permanentes que brotan de los anillos de crecimiento radical de los nuevos brotes. Son numerosas, gruesas, de rápido crecimiento y su proliferación avanza con el desarrollo de la planta. La cantidad, la longitud y la edad de las raíces permanentes dependen de las variedades, sin embargo, existen factores ambientales como el tipo de suelo y la humedad que influyen en estas características, para el caso de la zona cañera guatemalteca, las profundidades de raíces efectiva en la absorción alcanzan 60 cm en promedio para la etapa de elongación (rápido crecimiento).

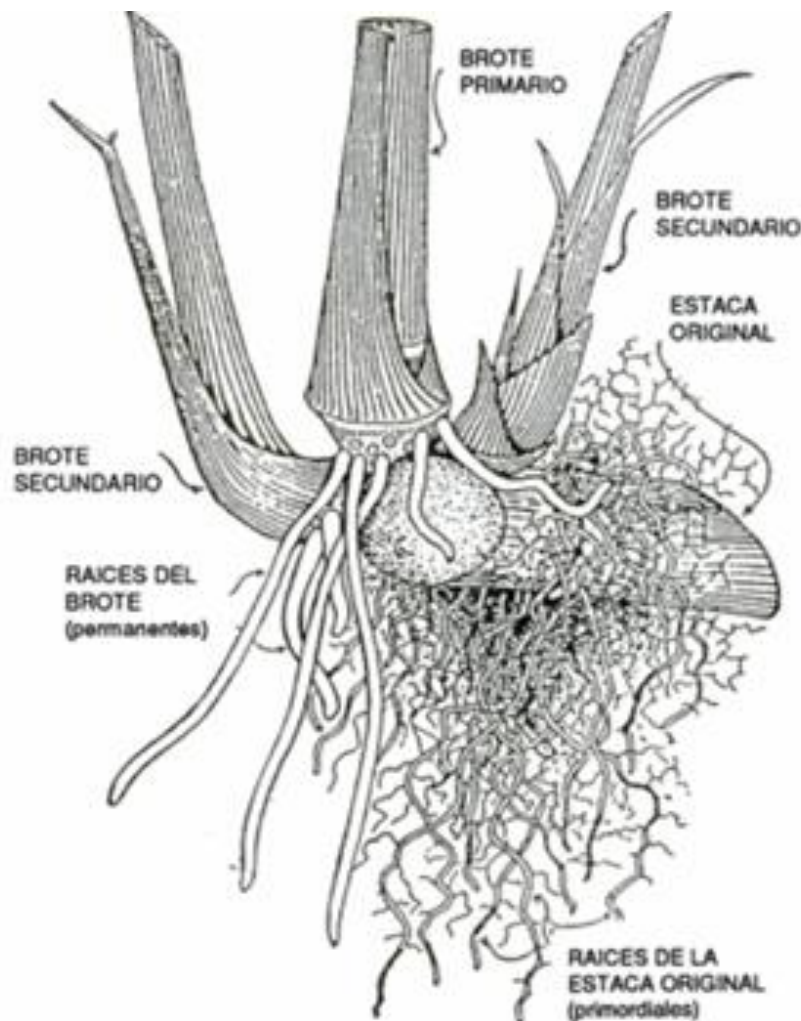


Figura 2.2. Raíces de la Caña de azúcar. Subirós, (2,000).

El Tallo, es el órgano más importante de la planta de la caña, ya que en él se almacenan los azúcares. La caña de azúcar forma cepas constituidas por la aglomeración de los tallos, que se originan de las yemas del material vegetativo de siembra y de las yemas de los nuevos brotes subterráneos. El número, el diámetro, el color y el hábito de crecimiento del tallo dependen principalmente de las variedades. El tamaño o longitud de los tallos depende, en gran parte, de las condiciones agroecológicas de la zona donde crece y del manejo que se le brinde a la variedad. El número de tallos se incrementa en el período que va de los 45 a los 135 días después del corte, el cual se conoce como macollamiento, tal como se observa en la Figura 2.3.

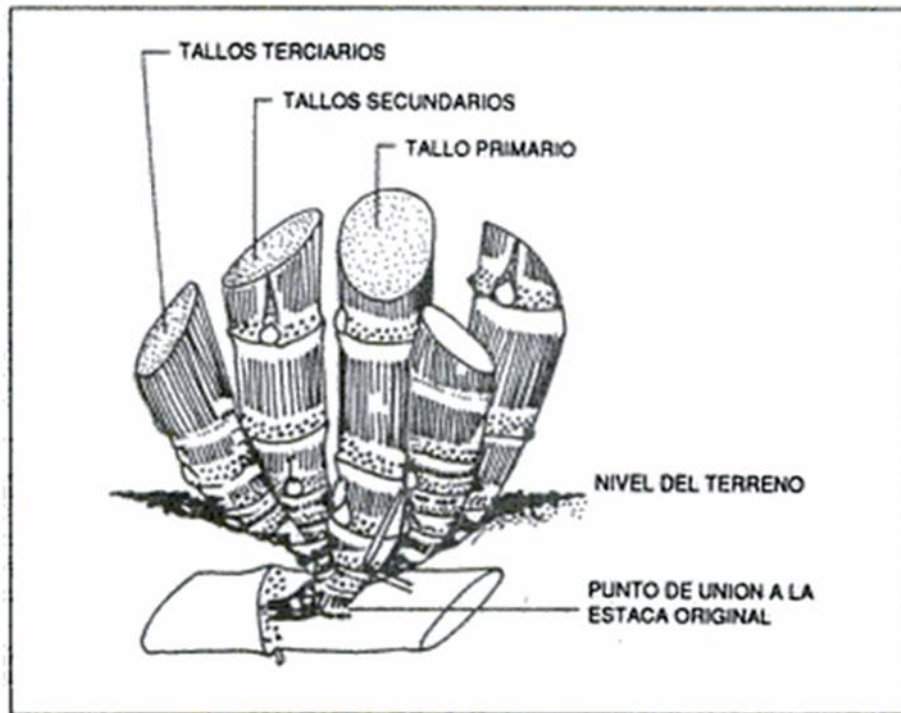


Figura 2.3. Formación de tallos en la etapa de macollamiento en caña de azúcar. Subirós, (2000).

El tallo se denomina primario, secundario, terciario, etc., si se origina de las yemas del material vegetativo original, del tallo primario, o de los secundarios, respectivamente (Ver Figura 2.3). Los tallos están formados por nudos, que se encuentran separados por entrenudos en los que se desarrollan las yemas y las hojas.

- Nudo, es la porción dura y más fibrosa del tallo de la caña que separa dos entrenudos vecinos. El nudo está formado por el anillo de crecimiento, la banda de raíces, la cicatriz foliar, el nudo propiamente dicho, la yema y el anillo ceroso.
- Entrenudo, es la porción del tallo localizada entre dos nudos. En la parte apical del tallo, los entrenudos miden unos pocos milímetros y en ellos ocurre la división celular que, a su vez, determina la elongación y la longitud final. El diámetro, el color, la forma y la longitud de los entrenudos cambian con las variedades.

La Hoja, Se originan en los nudos y se distribuyen en posiciones alternas a lo largo del tallo a medida que este crece. Cada hoja está formada por la lámina foliar y por la vaina o yagua. La unión entre estas dos partes se denomina lígula y en cada extremo de esta existe una aurícula con pubescencia variable. La forma y el color de la lígula, así como la forma de la aurícula, son características importantes en la diferenciación de las variedades de caña de azúcar (Figura 2.4).

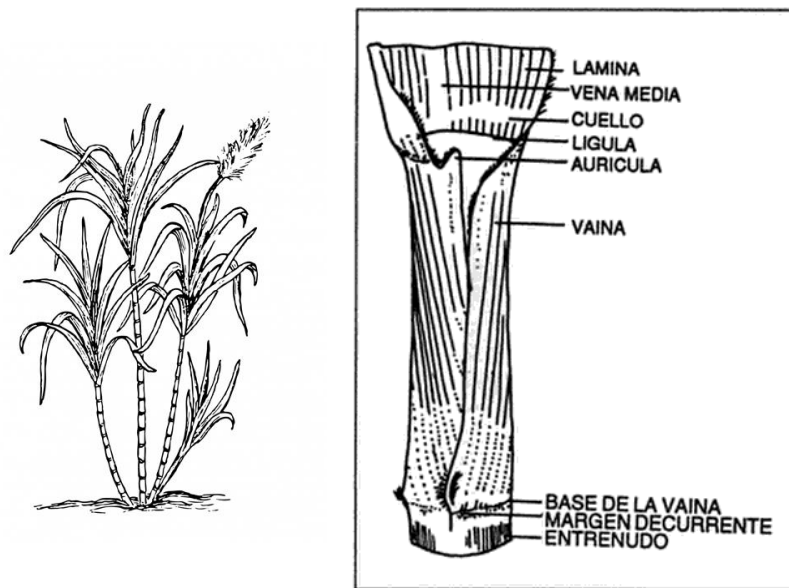


Figura 2.4. Estructura de la vaina de una hoja. Subirós, (2000).

La lamina foliar es la parte más importante para el proceso de fotosíntesis, su disposición en la planta difiere con las variedades, siendo las más comunes la pendulosa y la erecta. La disposición de la lámina no determina los rendimientos en sacarosa ni la producción de caña; por lo tanto, es posible encontrar variedades con altos o bajos rendimientos que tienen distintas formas de disposición de las hojas en cualquier densidad de siembra. La lamina foliar tiene una nervadura central que la recorre en toda su longitud y paralela a ella se encuentra las nervaduras secundarias. Los bordes presentan prominencias continuas en forma aserrada, cuyo número y longitud cambian con las variedades.

Yagua o vaina, tiene forma tubular, envuelve el tallo y es ancha en la base. Puede ser glabra o recubierta de pelos urticantes en cantidad y longitud que cambian con las variedades. Su color es, generalmente, verde cuando joven, pero cambia a rojo-purpura cuando la hoja logra su completo desarrollo.

La flor, La floración es una continuación de la fase vegetativa de la caña, ocurre cuando las condiciones ambientales de fotoperiodo, temperatura, disponibilidad de agua y nivel de nutrimentos en el suelo son favorables, Moore, (2005). La inflorescencia es una panícula sedosa en forma de espiga. Está constituida por un eje principal con articulaciones en las cuales se insertan las espiguillas, una frente de la otra; estas contienen una flor hermafrodita con tres anteras y un ovario con dos estigmas.

2.1.3. Etapas de desarrollo de la caña de azúcar

Como ha sido mencionado, la magnitud de la pérdida de agua por transpiración del cultivo depende del estado de desarrollo en que se encuentre. Por eso resulta de mucha

importancia conocer las distintas etapas de desarrollo de este cultivo, Subiros, (1995), las cuales se describen a continuación.

Iniciación: comienza cuando el cultivo ha sido recién sembrado y aun no ocurre la emergencia o cuando el retoño no ha emergido.

Macollamiento y cierre de plantación: proliferación de tallos, se desarrolla mayor cantidad de follaje y comienza a cerrar. El incremento del área foliar permite a la planta aumentar su capacidad para interceptar la radiación; a la vez, la evapotranspiración aumenta. Las raíces se desarrollan en mayor número y profundizan más.

Periodo de rápido crecimiento: el cultivo experimenta un desarrollo vigoroso y completo y por lo general, el porte permanece aún erecto. La planta experimenta una elevada tasa de transpiración como consecuencia del aumento del área foliar. El aumento del área foliar está en estrecha relación con la curva de evapotranspiración; por lo tanto, los requerimientos de agua son elevados en comparación con las necesidades detectadas en las dos fases anteriores.

Maduración: En esta fase se persigue reducir el nivel de humedad del suelo, para que los meristemos de los tallos cesen el crecimiento vegetativo y se propicie la translocación y acumulación de sacarosa del tallo.

Castro L. O, (2012), en el libro “El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala” muestra resultados del ensayo de un área lisimétrica realizado en Cengicaña 1997, sobre el comportamiento de crecimiento de la caña, determinó que el periodo de 135 a 250 días después de la siembra los tallos alcanzan su máximo crecimiento, denominándola etapa de elongación I (Tabla 2.1).

La etapa de elongación es un periodo relevante con requerimiento de agua entre 189 a 324 mm en el período de 115 días que dura la etapa, se le considera etapa crítica en la cual no debe permitirse el estrés hídrico, el requerimiento óptimo promedio es de 570 mm/115 días. Otra de las etapas consideradas como críticas es la etapa inicial debido a una condición de baja humedad en el suelo, la población por metro lineal se reduce significativamente.

Tabla 2.1. Etapas desarrollo en caña de azúcar en las condiciones de la zona cañera guatemalteca.

No.	Etapas fenológica	Duración (días)	Acumulado (días)	Requerimiento hídrico óptimo esperado (mm/duración etapa)
1	Iniciación	45		75
2	Macollamiento	90	135	297
3	Elongación I	115	250	570
4	Elongación II	65	315	322
5	Maduración	45	360	75

2.2. DESARROLLO DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN GUATEMALA

Según la publicación: El azúcar en Guatemala, su producción y exportación, Robles E, (2012), el cultivo de la caña de azúcar en Guatemala es uno de los más antiguos. Los primeros intentos se produjeron apenas concluida la parte armada de la Conquista; ya en 1,536 Amatitlán se había convertido en la principal área de producción del dulce, que también se sembraba en Jilotepeque, Escuintla, Guazacapán y la Verapaz. Aunque al principio la producción azucarera estuvo en manos de laicos, hacia fines del siglo XVI estaba prácticamente controlada por la Iglesia, en particular por jesuitas, mercedarios, dominicos y agustinos, quienes manejaban los ingenios de más alta producción, como el de San Jerónimo, cuyas ruinas es posible visitar en la actualidad. El cultivo del azúcar ayudó a introducir el uso de tecnología en aquellos siglos, pues precisaba de instalaciones para el procesamiento de la caña, por un lado, y de la infraestructura de Comunicación y transporte necesario para sacar el producto a los centros de distribución y consumo, habiendo sido uno de los avances de los primeros años de la conquista de Guatemala.

Actualmente, la agroindustria azucarera está asociada y se ha convertido en una de las principales fuentes de divisas para el país y generadora de abundantes empleos en la economía guatemalteca. Sus 12 ingenios y las cinco organizaciones que la integran contribuyen decisivamente al desarrollo de medio centenar de municipios del país y de más de un millón de personas, con lo que se constituye en un factor determinante para el progreso de Guatemala.

La normativa que dio vida a la Asociación de Azucareros de Guatemala (Asazgua) fue aprobada el 17 de septiembre de 1957 en la ciudad de Guatemala. Esta la define como una entidad autónoma, apolítica y no lucrativa, integrada por los productores de azúcar

de la República que deseen pertenecer a la misma. En la Figura 2.5 se muestra los ingenios activos de la agroindustria azucarera de Guatemala.



Figura 2.5. Ingenios activos de la agroindustria azucarera de Guatemala. Asazgua, (2017).

2.2.1. Importancia de la caña de azúcar en Guatemala

El informe anual de la Asociación de Azucareros de Guatemala Asazgua, (2017) afirma que la exportación de azúcar ha aumentado a partir de la zafra 2012-13, a partir de esta zafra, las exportaciones se han mantenido arriba de 60.4 millones de quintales de azúcar. En la actualidad la producción se destina el 75% para exportación y el 25% para consumo interno, tal como se muestra en la Figura 2.6.

Según el Banco de Guatemala, Banguat, (2016), las divisas generadas por las exportaciones de azúcar en el 2010 alcanzaron \$723 millones, mientras en 2011 llegó a \$ 648,819.2. Mario Yarzebski, encargado de negociaciones comerciales internacionales de Asazgua, explicó que las exportaciones aumentaron por una mayor demanda ante un mercado que prefiere la calidad de los granos de azúcar producidos en Guatemala.

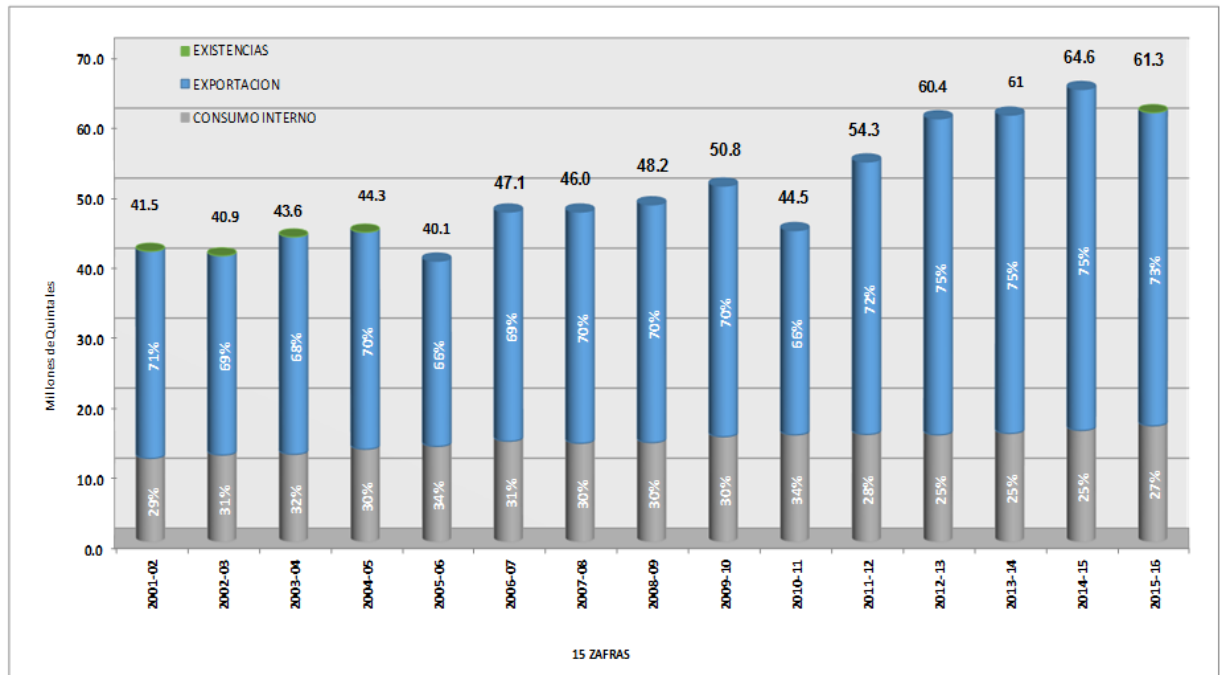


Figura 2.6. % de producción para el consumo interno y la exportación 2001-02/2015-16. Agroindustria cañera de Guatemala. Asazgua, (2017).

Según la publicación de Cengicaña, Melgar et al (2012), se indica que desde el inicio de la producción de azúcar en cualquiera de sus formas o presentaciones (guarapo, miel concentrada o meladura, panela, moscabado, melcocha, azúcar crudo, azúcar de mesa, etcétera) hasta los inicios del siglo XX, el objetivo principal y casi único de los trapiches e ingenios era la producción del edulcorante conocido como sacarosa.

La energía necesaria era provista por tracción animal o humana y por leña extraída de bosques aledaños.

El principal subproducto de esos procesos era la melaza que, en algunas ocasiones y según las circunstancias, era considerada un “desecho” y una molestia y se utilizaba para compactar el polvo de las carreteras de tierra. Posteriormente, se le encontró uso y valor como suplemento nutricional en alimento para ganado y principalmente como sustrato (fuente de carbono) para la incipiente industria de bebidas alcohólicas (etanol potable).

Al irse mejorando el proceso de molienda, también se le encontró uso a otra molestia que se acumulaba: el bagazo de la caña, que comenzó a utilizarse como combustible para la generación de calor y energía de movimiento.

De manera que la etapa siguiente del desarrollo de la industria azucarera ya tenía además del producto principal, el azúcar, dos subproductos con un valor considerable: la melaza y el bagazo.

Con el advenimiento de la crisis energética a principios de la segunda mitad del siglo XX, surgió la oportunidad de agregarle valor a dos derivados de los subproductos principales:

la generación de etanol combustible en destilerías anexas a los ingenios, las que a su vez presentaban el problema de dos subproductos consiguientes, la vinaza y el dióxido de carbono (CO_2). En la mayoría de los casos el CO_2 es liberado al ambiente y ocasionalmente aprovechado industrialmente en bebidas carbonatadas o comprimido para la elaboración de hielo seco, muy utilizado para la preservación de alimentos.

Recientemente la vinaza dejó de ser considerada como un “desperdicio” y pasó a ser un subproducto valioso del cual se puede recuperar calor, proteína, nutrientes para fertilización, sustrato para la producción de metano, etc.

Actualmente, un ingenio azucarero integrado puede estar produciendo varios productos y subproductos valiosos para la economía del país:

- Azúcares: crudo, moreno, blanco, cristal y refino.
- Bagazo
- Fibra ligno-celulósica para producir vapor, calor, movimiento/trabajo/electricidad.
- Miel: meladura hidrolizada (invertida o HTM).
- Melaza: suplemento para alimentación de ganado,
- Etanol: potable, industrial y combustible.
- Vinaza: fertilizante,
- Metano
- Proteína unicelular.

Según Alfaro, J. L. et al, (2012), indica que el futuro de la agroindustria de Guatemala son las biorefinerías. Debe de aprovecharse cada fracción de la caña de azúcar en una gran diversidad de productos y subproductos según su factibilidad técnica y económica en determinados momentos del mercado.

Ya en los años sesenta, Paturau (Byproducts of the Sugar Cane Industry), citado por Alfaro, J. L. et al, (2012) mencionaba una cantidad considerable de productos químicos especiales que podrían obtenerse directamente del uso de la sacarosa y la melaza como reactivos, y del uso del bagazo como fuente de fibra y celulosa para la elaboración de diversos productos aglomerados como se observa en Figura 2.7



Fuente: Paturau, J.M: "By-products of the cane sugar industry". Elsevier, citado por Alfaro (2012)

Figura 2.7. Productos de la sacarosa de potencial importancia.

2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA CAÑERA GUATEMALTECA

La zona cañera de la costa sur de Guatemala, se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas 91°50'00''- 90°10'00'' Longitud Oeste y 14°33'00''- 13°50'00'' Latitud Norte. Geopolíticamente está localizada en los departamentos de Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla, Santa Rosa y actualmente se está expandiendo hacia el departamento de Jutiapa. La ubicación se presenta en la Figura 2.8. Villatoro, (2012).



Figura 2.8. Ubicación geográfica de la Zona Cañera de la costa sur de Guatemala. Datum horizontal WGS84. Fuente mapa base: Mapa de Cobertura de Uso del Suelo y Uso de la Tierra, escala 1:50,000. 2006. MAGA-UPGGR. Actualizado 2008. Braulio Villatoro. SIAP-Cengicán.

2.3.1. Clima

La zona cañera de Guatemala se divide en cuatro estratos, para su división se tomó como criterio el comportamiento de la precipitación atmosférica, comportamiento diferenciado debido a que la fisiografía de la región corresponde a un paisaje natural de planicie de pie de monte y forma un plano inclinado, que se inicia con pendientes de 7 a 25 % cerca de la cadena montañosa, con relieve ondulado o de lomerío y va descendiendo, suavemente hacia la costa del Pacífico con relieve plano, Cengicán, (1996). De esta manera, se definió, el estrato litoral de 0 a 40 msnm, el estrato bajo de 40 a 100 msnm, el estrato medio de 100 a 300 msnm y el estrato alto de 300 msnm hacia arriba. La ubicación de los cuatro estratos en la zona cañera se presenta en la Figura 2.9 y las características climáticas por estrato se presentan en el Tabla 2.2. Villatoro, (2012)

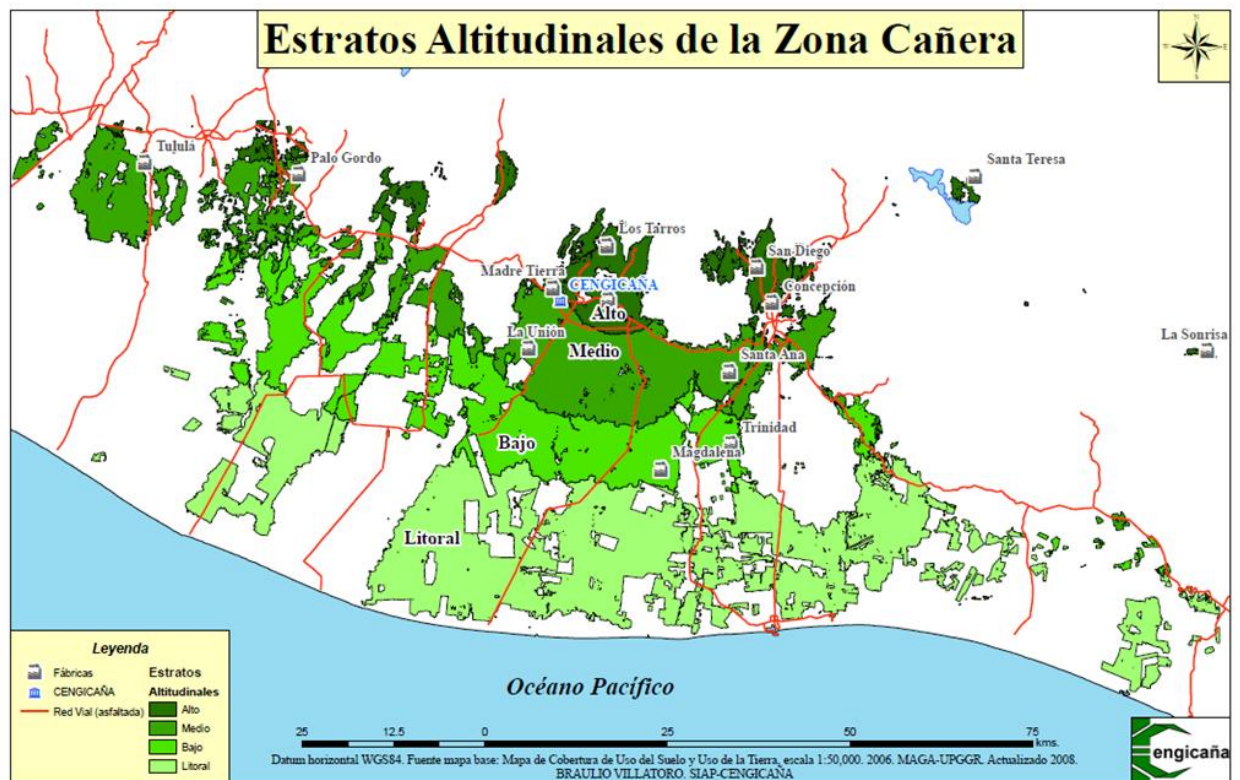


Figura 2.9. Estratos Altitudinales de la Zona Cañera Datum horizontal WGS84. Fuente mapa base: Mapa de Cobertura de Uso del Suelo y Uso de la Tierra, escala 1:50,000. 2006. MAGA-UPGGR. Actualizado 2008. Braulio Villatoro. SIAP-Cengicaña.

Tabla 2.2. Características climáticas en la zona cañera guatemalteca.

Estrato	Altitud (msnm)	Lluvia anual (mm)	Temperatura (°C)			Radiación solar (MJ/m ² /día)	Velocidad media del viento (Km/h)
			Min	Media	Max.		
Alto	>300	4100	20.2	26.2	32.2	17.7	5.2
Medio	100-300	3700	20.5	26.7	32.2	17.3	6.8
Bajo	40-100	1900	21.2	27.3	33.8	18.4	6.2
Litoral	<40	1500	21.0	27.5	33.4	18	8.7

Fuente de información: estaciones meteorológicas, administrada por ICC

Como se observa en el Tabla 2.2, el comportamiento de las variables radiación solar y temperatura es mayor en las cercanías a la costa y disminuye conforme se

asciende en la zona cañera. Caso contrario, la precipitación pluvial disminuye conforme se descende a la costa.

Las lluvias en la zona se distribuyen en dos estaciones: época lluviosa (llamado invierno) que ocurre normalmente entre mayo y octubre; en tanto que junio y septiembre registran la mayor precipitación, también existe un período llamado canícula (del 15 de julio al 15 de agosto disminuyen las lluvias, el cual se presenta en todos los años). La época no lluviosa (llamado verano) se marca entre noviembre a mayo; los cuales coinciden con el período de zafra.

2.3.2. Suelos

2.3.2.1. Material parental

El material sobre el cual se han desarrollado los suelos de la región cañera está principalmente constituido por cenizas, lapilli, pómez y otros materiales piroclásticos, derivados de las erupciones volcánicas ocurridas en diferentes épocas, especialmente, durante la Cuaternaria Cengicana, (1996).

Las características mineralógicas y granulométricas de los materiales varían de un lugar a otro, según su localización geográfica, considerada, básicamente en relación con las distancias al cono volcánico. La Alófana es el mineral predominante en los suelos de las partes alta y media, en tanto que en las partes más bajas hay presencia de Haloisita y arcilla tipo 2:1 probablemente Esmectita, en estas partes bajas al occidente y oriente de la región, Villatoro, (2012)

2.3.2.2. Clasificación de los suelos de la región

En la región existen seis órdenes de suelos, nueve subórdenes, 13 grandes grupos, 25 subgrupos y 37 familias. En orden de importancia por el área que ocupan los órdenes son: Mollisoles (40 %), Andisoles (26 %), Entisoles (16 %), Inceptisoles (11%), Alfisoles (1.6 %) y Vertisoles (0.5 %).

La ubicación de los diferentes suelos en la región tal como se observa en la Figura 2.10 responde al paisaje natural, considerando que los materiales fluvio-volcánicos se distribuyen a través de los flujos de las corrientes de agua que descienden de la montaña y su curso depende de la forma del relieve y de la pendiente. De esta manera se observa que los Andisoles (suelos de formación reciente) se encuentran en las zonas altas y medias de la región, que tienen alta precipitación pluvial; en tanto que los Mollisoles se ubican en las zonas bajas y litoral, en suelos planos, donde la precipitación pluvial es menor. Cengicana, (1996).

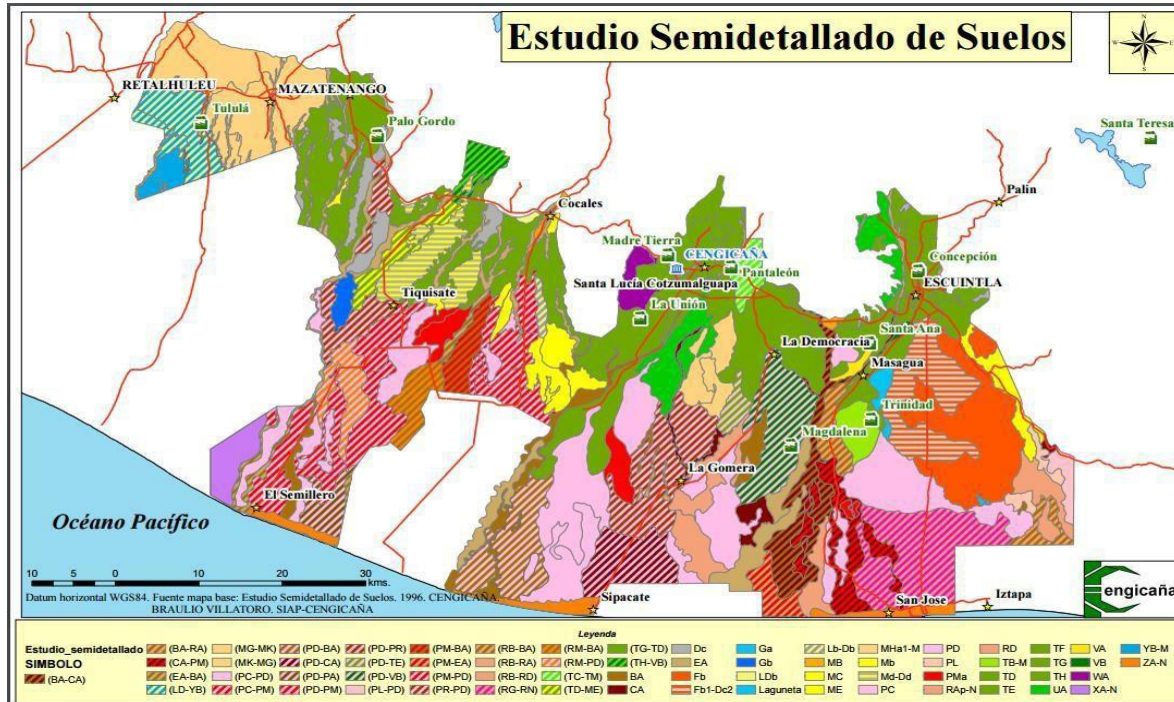


Figura 2.10. Mapa de clasificación de suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. Fuente: SIAP-Cengicaña

2.3.2.3. Grupo de manejo de suelos

La formación de los grupos de manejo se basó en la información del Estudio semidetallado de suelos de la zona cañera de Guatemala, Cengicaña, (1996), haciendo una adaptación de la agrupación original. Los suelos se clasificaron de acuerdo con el Manual de Conservación del Suelo y del Agua del Colegio de Post-graduados, de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos de México (adaptado para el cultivo de caña de azúcar en Guatemala) y la familia taxonómica correspondiente, Cengicaña, (2002).

Los factores utilizados para la definición de las clases de suelos se dividieron en dos grupos: factores limitantes y factores auxiliares. Los factores limitantes -por su rango de variación e importancia- definen clases específicas, en tanto que los factores auxiliares no necesariamente definen una clase, pero describen condiciones especiales de manejo. Los factores limitantes más importantes determinados para la agrupación en los suelos de la región fueron: clima, la susceptibilidad a la erosión, la topografía y el suelo; mientras que los factores auxiliares fueron: la textura, la permeabilidad y la reacción del suelo (pH), Cengicaña, (2002).

El análisis de los factores limitantes y auxiliares dio como resultado 13 grupos de suelos, correspondientes a la existencia de cuatro clases de suelos (clases agrologicas). Cada clase de suelo se identificó con el respectivo factor limitante o factores limitantes, según

nomencultura convencional, mientras que el o los factores auxiliares se acompañan entre paréntesis. La ubicación geográfica de los grupos de manejo de suelos se presenta en la Figura 2.11. De los 13 grupos los más predominante en la zona cañera son los Mollisoles secos (Grupo SO3) que ocupan el 37.1 por ciento del área, seguido por los suelos Entisoles que tienen baja retención de agua por la presencia de capas de arena en el perfil (Grupo S10) con el 19.9 por ciento. Otros suelos importantes son los suelos Andisoles profundos bien drenados (Grupo SO2), los suelos Mollisoles profundos de alta fertilidad (SO1) y los Andisoles superficiales (SO8) que ocupan el 13.4, 8.4 y 7.6 por ciento del área respectivamente Villatoro et al., (2017).

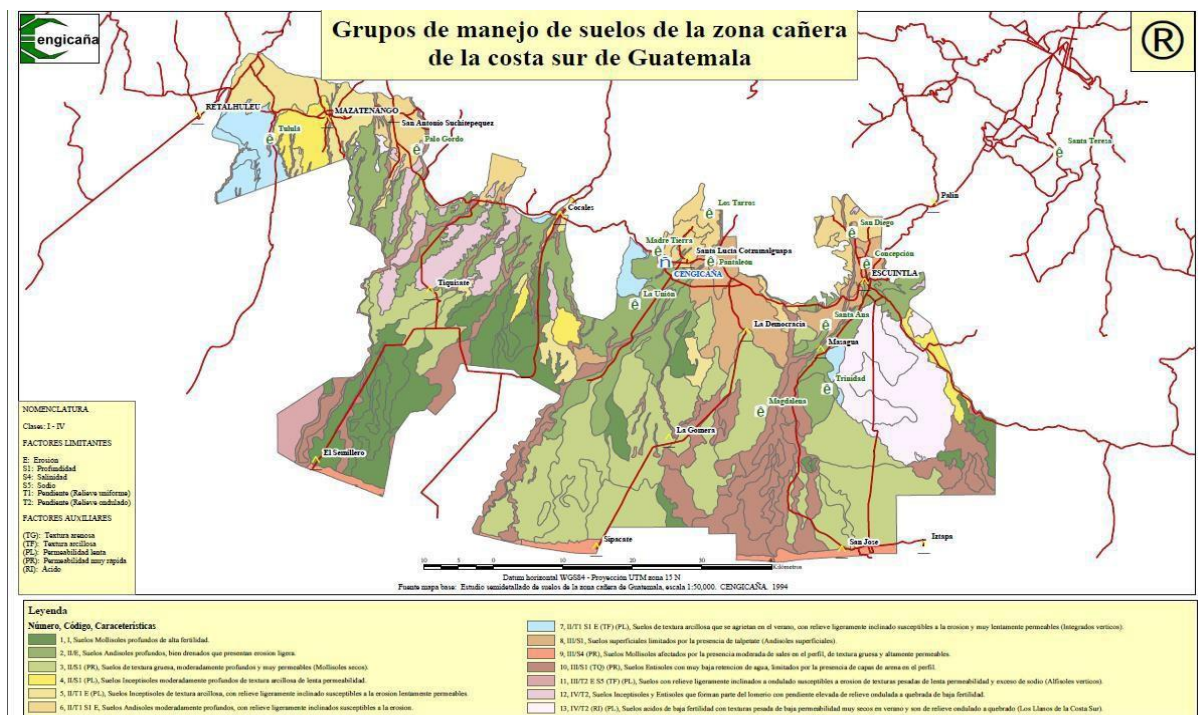


Figura 2.11. Grupos de manejo de suelos de la zona cañera de la costa sur de Guatemala.

En la Tabla 2.3. se analiza los grupos de manejo de suelos y su relación con la capacidad de almacenamiento según el número de hectáreas. De estos grupos, el 3 es el más predominante y es capaz de almacenar más 1.1 millones de m³ de agua/cm de profundidad del suelo, en un área que ocupa en 67,702 has. Luego le sigue el grupo 10 con capacidad de almacenamiento de 0.7 millones de m³ de agua/profundidad.

Tabla 2.3. Relación del grupo de manejo del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua. Fuente: B. Villatoro, 2017.

Grupos de manejo	ha	Ponderado Capacidad de almacenamiento del suelo (mm/cm de profundidad)	m ³ /cm de prof.	%
0	74	1.65	1,218	0.03
1	17,646	1.65	291,326	8.30
2	33,987	1.61	546,450	15.57
3	67,702	1.64	1,112,635	31.70
4	5,092	1.66	84,430	2.41
5	4,206	1.66	69,822	1.99
6	11,191	1.51	169,127	4.82
7	9,222	1.63	150,702	4.29
8	16,477	1.59	262,288	7.47
9	521	1.69	8,789	0.25
10	41,398	1.60	662,337	18.87
11	677	1.61	10,900	0.31
12	4,499	1.60	71,777	2.04
13	4,092	1.67	68,408	1.95
Σ	216,784		3,510,209	100.00

2.3.2.4. Zonificación agroecológica (ZAE)

La zonificación agroecológica se obtuvo de la interacción de dos capas geográficas correspondientes a los grupos de manejo de suelos y los grupos de isobalance, generados por Cengicaña, a través del balance hídrico del período octubre-mayo. Para ello a cada zona se le asignó un código alfanumérico compuesto por cinco caracteres; los primeros tres caracteres indican el grupo de suelo (ej. S01=grupo de suelos 1) y los últimos dos indican el grupo de isobalance (ej. H2=grupo de isobalance 2). También a las zonas se les asignó un número correlativo del uno en adelante como grupo de ZAE. En esta primera aproximación se obtuvieron 44 zonas

agroecológicas. El mapa base que se utilizó para la primera aproximación de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en la zona cañera de la costa sur de Guatemala fue el mapa de grupos de manejos de suelos, el mapa de la zonificación agroecológica se presenta en la Figura 2.12, Villatoro et al., (2010). La zonificación agroecológica actualmente se está utilizando para analizar los resultados de la zafra, para estudios comparativos de productividad entre los ingenios, para la ubicación adecuada de los ensayos regionales y semicomerciales de variedades y de la extrapolación de los resultados de investigación y para relacionar variables de manejo.

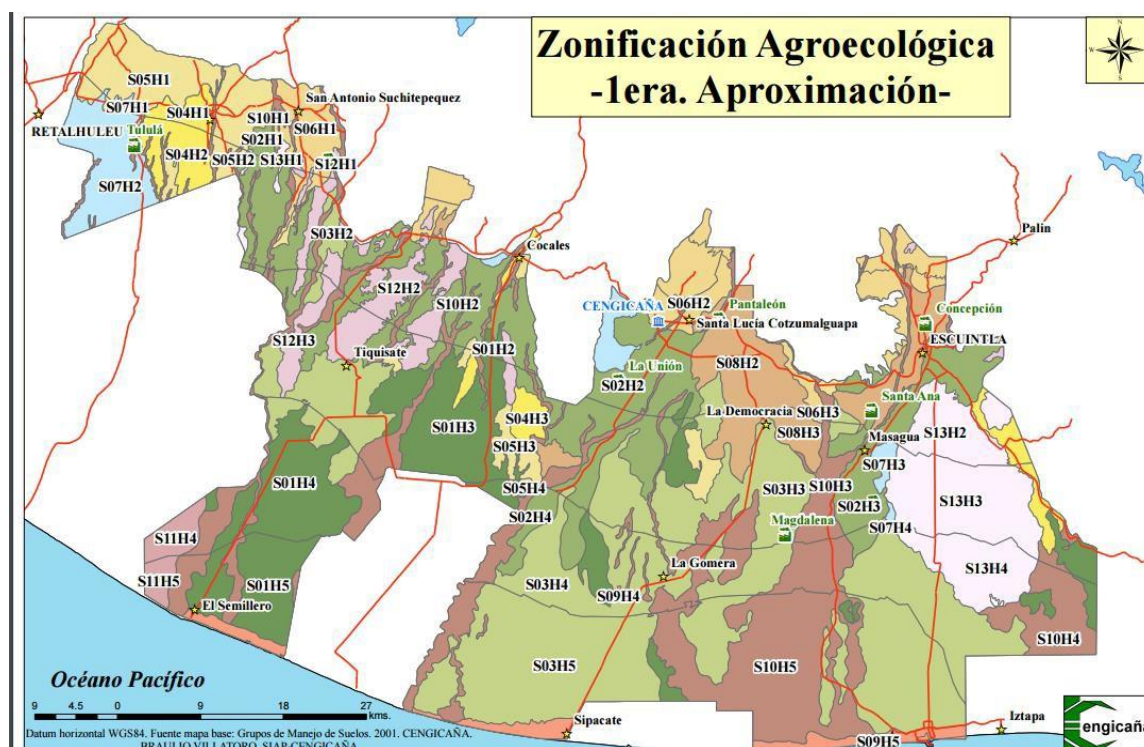
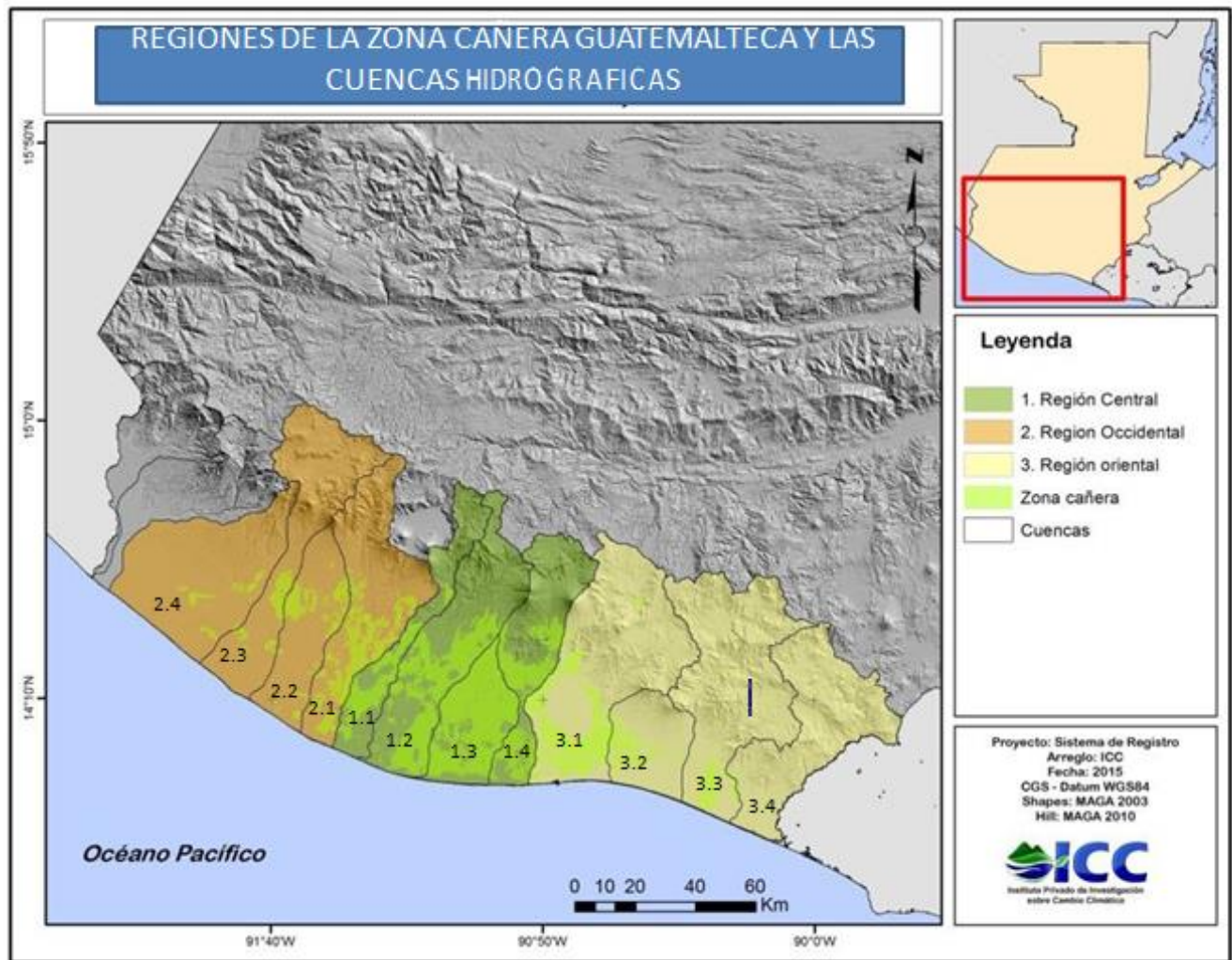


Figura 2.12. Zonificación agroecológica de la zona cañera guatemalteca.

Las regiones de la zona cañera guatemalteca y su interrelación con las cuencas Hidrográficas se ilustran en la Figura 2.13 y 2.14. Como se observa, la región central donde se ubican las Cuencas: Coyolate, Acomé, Achíguate y María Linda, son las de mayor importancia para la industria azucarera guatemalteca, desde el punto de vista hídrico.



Fuente: Gil, S (2015)

Región Central: 1.1. Cuenca del río Madre Vieja. 1.3. Cuenca del río Coyolate. 1.3. Cuenca del río Acomé. 1.4. Cuenca del río Achíguate. **Región Occidental:** 2.1. Cuenca río Nahualate. 2.2. Cuenca del río Sis-Ican. 2.3. Cuenca del río Samalá. 2.4. Cuenca del río Ocosito. **Región Oriental:** 3.1. Cuenca del río María Linda. 3.2. Cuenca del río Paso hondo. 3.3. Cuenca del río Los Esclavos. 3.4. Cuenca del río La Paz. (Gil, S. 2015).

Figura 2.13. Las regiones de la zona cañera y su interrelación con las cuencas hidrográficas de la zona cañera guatemalteca.

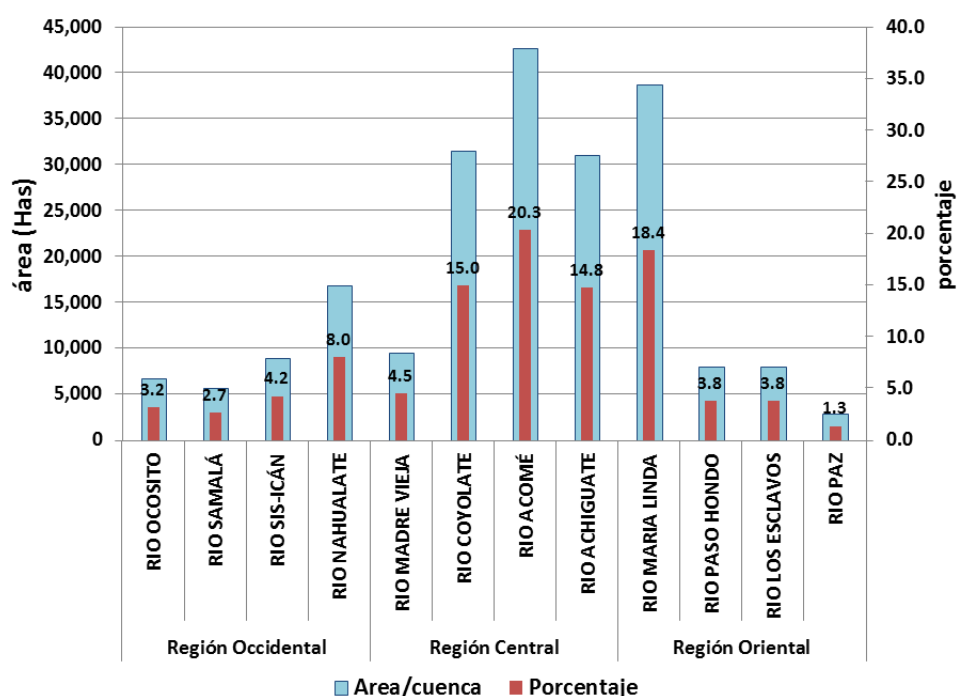


Figura 2.14. Área física sembrada de caña y su interrelación con las cuencas hidrográficas ubicadas en la zona cañera guatemalteca. Castro L, O. (2016).

Lo importante, es que la gestión de los recursos hídricos comienza a realizarse en todo el mundo a partir de la unidad básica que es la cuenca hidrográfica. Tener delimitada la misma, permitirá hacer un adecuado balance hídrico en la zona irrigada que es uno de los propósitos de este trabajo.

2.4. EL RIEGO

2.4.1. Importancia

Se observa que en determinadas latitudes de los hemisferios norte y sur el balance entre precipitación y la evaporación es negativo, con lo que, en terrenos de cultivo, entramos en el dominio de la irrigación.

Este balance negativo es posible que también se produzca en otras latitudes, aunque el balance global no sea negativo, como puede suceder, en nuestro caso en el trópico, referido a determinados periodos anuales, como la estación seca, Neira, X. (2014).

Cuando el balance es negativo, el suelo no tiene la cantidad suficiente de agua se hace necesario el riego. El riego es el suministro artificial de agua a los cultivos.

Un adecuado sistema de riego, suministra la cantidad necesaria de agua en el momento que se necesita, humedeciendo el suelo hasta la profundidad que requiera el cultivo.

Los cultivos tienen momentos críticos para sus necesidades de agua, que si no se subsanan, se traducen en pérdidas en rendimiento o por falta de germinación. En las actuales condiciones de sequía de nuestro país, se evidencian las necesidades de distritos de riego en diferentes zonas.

2.4.2. Realidad mundial

Sanchez A. R. (2013) describe que toda el agua que existe en el mundo, tan solo el 3% es agua dulce y de esta, la agricultura utiliza cerca del 70%, lo cual sumado a la influencia del cambio climático, que, en ciertas áreas, modifica el régimen de lluvias, ya sea aumentándolo o disminuyéndolo, y a la gran presión que ejerce nuestra creciente población mundial, hace que sea imperativo buscar métodos para disminuir el consumo de agua de la agricultura, pero manteniendo o aumentando la producción por área de cultivo y además permitiendo obtener productos que logren satisfacer la demanda en cuanto a calidad que el consumidor le ha impuesto al mercado.

El uso del riego en la agricultura es una práctica antigua, desarrollada con la finalidad de proveer una cantidad adecuada de agua para el correcto desarrollo de los cultivos y permitir así la producción de alimentos en la época seca, en la cual no existen lluvias frecuentes. Esto posibilitó la existencia constante de alimento y gracias a esto los pueblos lograron asentarse y desarrollarse. El agua es tan importante para la agricultura debido a que crea una solución en el suelo en la cual se encuentran disueltos los nutrientes y mediante la absorción efectuada por sus raíces, las plantas logran acceder a estos. Asimismo, mediante el fenómeno de la transpiración, estos nutrientes pueden ser transportados desde la rizosfera a la parte aérea de la planta.

Aunque la irrigación es una herramienta agronómica y tal vez económicamente viable, es importante mencionar que un abuso en su uso puede causar severos daños ambientales, tales como la erosión y la salinización del suelo, ocasionados por el arrastre que ejerce el agua sobre la superficie y a la utilización de agua de riego con altos contenidos de sales, respectivamente. El uso excesivo de este recurso para este fin puede afectar los ciclos químicos y biológicos del cuerpo de agua del cual está siendo extraído, pudiendo causar alteraciones que muchas veces son irreversibles, por ejemplo, la pérdida de la Mar Aral, originada por una excesiva extracción de agua para irrigación agrícola.

2.4.3. Expansión mundial

FAO (2016) indica en Aquastat que el riego y el drenaje son considerados como un elemento fundamental en la producción agrícola debido a su efecto en el incremento de la producción, la mejora de la calidad de los productos, la intensificación sostenible del uso de la tierra, la diversificación en la producción y su contribución a la mejora de la seguridad alimentaria. En el año 2012, había en todo el mundo más de 324 millones de hectáreas equipadas para el riego, de las cuales, aproximadamente el 85 por ciento, o 275, están efectivamente regadas y la agricultura de regadío representa el 20 por ciento de la superficie total de tierra cultivada, y supone el 40 por ciento de los alimentos producidos en todo el mundo.
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/indexesp3.stm>

Además FAO (2016) analizó que el crecimiento en la región de América Latina y el Caribe también ha sido proporcionalmente importante en el período 1960-1997, aunque la región sólo constituye un pequeño porcentaje de la superficie bajo riego en el mundo. Los países que se presentan en esta publicación tienen algo más de 18 millones de hectáreas de superficie bajo riego, cerca del 7 por ciento de la superficie total bajo riego en el mundo.
<ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/wr20.pdf>

2.4.4. Desarrollo del riego

La importancia de la superficie bajo riego con respecto al total de la región. Estas subregiones son: México, América Central, Antillas Mayores, Antillas Menores, Subregión Guayanesa, Subregión Andina, Brasil y Subregión Sur.

En la mayor parte de los países de la región, el riego se ha desarrollado de una forma importante durante el último siglo XX y particularmente a partir de los años 1950 (Figura 2.15). Aunque el crecimiento ha sido sostenido en el período 1961-1997, se observa una recesión regional desde mediados de los años 70 hasta finales de los años 80, que contrasta con las altas tasas de crecimiento de los años 60. Las causas del estancamiento de los años 70 han sido descritas en el caso de algunos países como Argentina, Chile o México, en contraste con el continuado incremento de la superficie bajo riego en Brasil en este período. Cabe destacar la disminución en la superficie bajo riego en Cuba (cerca de 200 000 ha, alrededor del 1 por ciento del total de la superficie bajo riego de la región), que ha tenido una repercusión sobre las cifras regionales en el período 1991-1996. Esta disminución en la superficie bajo riego fue debida a la crisis económica provocada por la caída de los mercados de la antigua Unión Soviética y los países del Este de Europa.

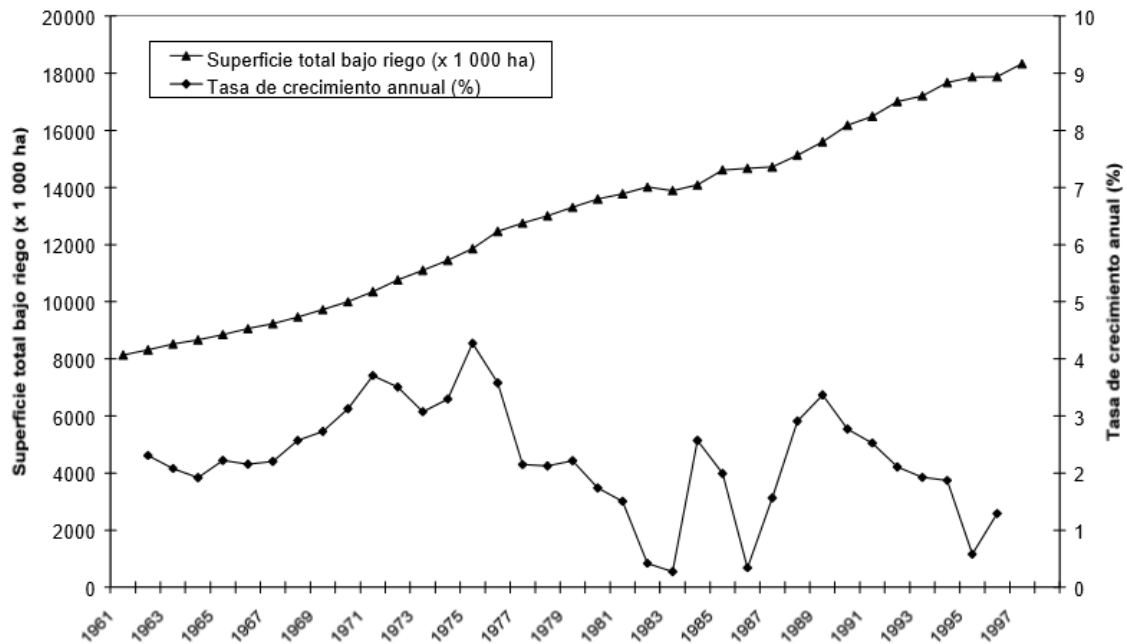


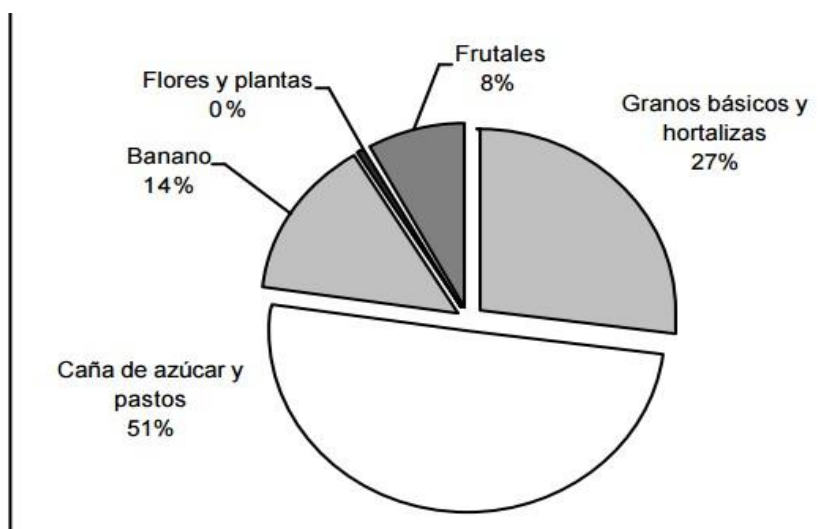
Figura 2.15. Evolución de la superficie del riego en la región latinoamericana (1961:1997) <http://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/wr20.pdf>

2.4.5. Desarrollo y realidad del riego en Guatemala

FAO, (2000); en Water reportes #20 menciona que en Guatemala el riego se concentra principalmente en tres regiones:

- (i) costa Atlántica, con índice de humedad negativo durante más de la mitad del año y alta evapotranspiración potencial cultivada de banano, hortalizas (tomate, melón, sandías, y otros) y tabaco;
- (ii) altiplano de zonas templadas a frías, sin lluvias durante 6 meses.
- (iii) las zonas bajas costeras cálidas del Pacífico, con plantaciones de caña de azúcar, banano y pastos en las fincas de mayor extensión, cuya superficie regada no se conoce con precisión.

Las estadísticas de producción agropecuaria son llevadas generalmente por la iniciativa privada y recopiladas por el Departamento de Estadísticas Económicas del Banco de Guatemala. Banguat (2016). En la actualidad esta proporción sigue siendo válida y representativa. Los valores publicados no especifican rendimientos de cultivos bajo riego o de secano (Figura 2.16).



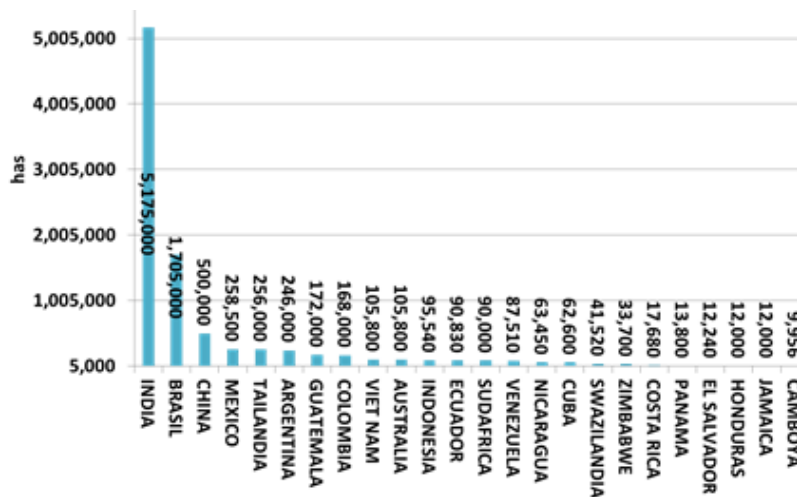
Fuente: Departamento de Estadísticas Económicas del Banco de Guatemala

Figura 2.16. Superficie de riego por cultivos en Guatemala en 1997

Guatemala no dispone de un instrumento legal específico que norme los usos y aprovechamientos del recurso agua, ni existe un ente superior de gobierno regulador en materia de aguas. La Constitución de la República (1985) estipula que todas las aguas son bienes de dominio público, inalienables e imprescriptibles, quedando su aprovechamiento uso y goce otorgados por ley de acuerdo con el interés social. El Código Civil, sin embargo, reconoce la propiedad privada de las aguas dentro de los terrenos privados, pero las considera del dominio público cuando salen de las fincas o predios donde nacen o escurren. Con el propósito de modernizar y ordenar el uso y aprovechamiento de los Recursos Hídricos, se encuentra en proceso de estudio y aprobación la Ley Nacional de Aguas.

2.5. EL RIEGO EN CAÑA DE AZÚCAR

El riego en caña de azúcar en el mundo, es una labor que se aplica en todas áreas cañeras como se observa en la Figura 2.17. Generando incrementos en promedio de 20 TCH en relación a no regar.



Fuente: AQUASTAT, FAO (2016)

Figura 2.17. Área de riego en los principales productores de caña en el mundo

2.5.1. Características fisiológicas a ser consideradas para un manejo eficiente del agua

Un abastecimiento no controlado de agua disminuye la producción de caña y/o de azúcar, mientras que un estrés hídrico moderado aumenta la producción.

Los riegos excesivos durante la fase de emisión de retoños deben ser evitados, ya que coinciden con el período de desarrollo activo de las raíces e impiden la absorción de nutrientes, debido a la escasa difusión del oxígeno en el suelo.

La longitud de la caña determina la capacidad disponible de almacenaje de azúcar, ya que en la caña de azúcar no hay engrosamiento secundario del tallo.

Un período de seca de 4 a 6 semanas antes de la cosecha asegura una óptima producción de azúcar.

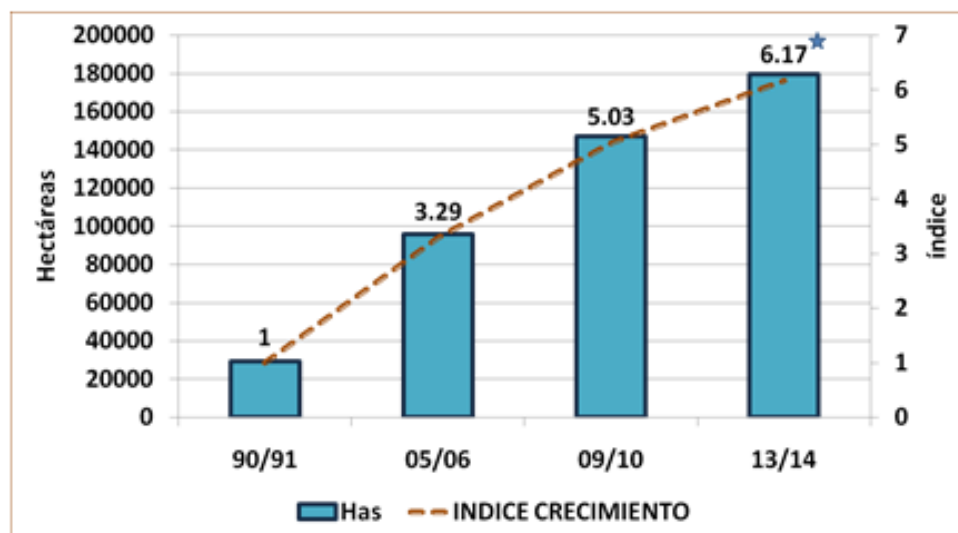
La reducción del riego durante el período entre maduración y floración ayuda a controlar la floración.

http://www.sugarcane crops.com/s/agronomic_practices/irrigation_water_management/

2.6. EL RIEGO EN LA ZONA CAÑERA GUATEMALTECA

En la zona cañera de Guatemala el riego se aplica normalmente entre el 15 de noviembre y el 15 de mayo, período seco que coincide con la zafra (cosecha de la caña de azúcar). La magnitud y duración de este período seco es variable en cada uno de los estratos altitudinales de la zona y en cada uno de los años, siendo el estrato litoral (de 0 a 40 msnm) el más seco y en el que se presentan períodos, en el ciclo de cultivo, con muchas irregularidades en el comportamiento de la lluvia en el período de invierno que, en nuestra latitud, se refiere al período de lluvia.

La caña de azúcar en Guatemala, en relación a los inicios de la década de los años 90, en la actualidad (2010-2019), se riega 6.17 veces más, que significa que el 87 % del área administrada por los ingenios se riega, como se observa en la Figura 2.18.



Fuente: Castro L. O. (2015). Cengicaña

Figura 2.18. Crecimiento del riego en la zona cañera guatemalteca

2.6.1. El manejo del recurso hídrico en la actividad del riego zona cañera guatemalteca

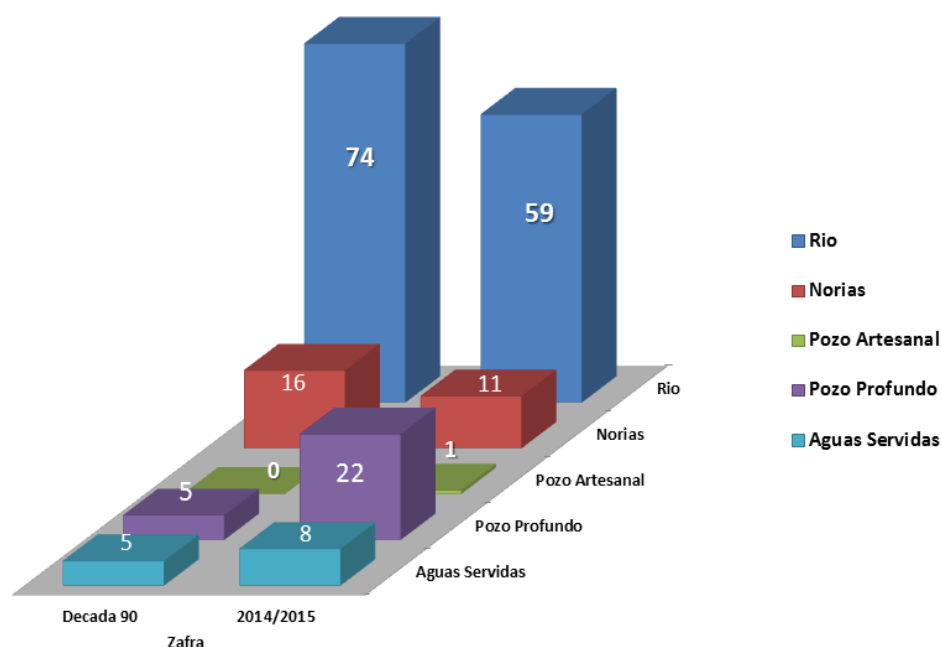
En cada una de las cuencas, el manejo del recurso hídrico destinada a la actividad del riego incluye: el uso de las fuentes de agua y su disponibilidad, la época de uso, métodos y sistemas de riego utilizados, la evolución de los métodos y sistemas de riego y la visualización del riego para el 2020.

2.6.1.1. Fuentes de agua utilizadas y su disponibilidad

Como se observa en la Figura 2.19 la fuente superficial proveniente de ríos, ha sido la más explotada, en la zafra 2014/15 ocupó el 54% del total de las fuentes, le sigue el uso de pozos profundos con 22%.

En la década de los noventa, los ríos constituyeron la fuente más utilizada con 74 %, para su derivación en la mayoría de los casos utilizan la fuerza de gravedad y algunos casos bombas y las Aguadas o conocidas como Norias eran la segunda fuente, principalmente, en el estrato bajo y litoral. En la actualidad, debido al crecimiento de las áreas de caña, banano y palma africana, la demanda de agua durante el período de zafra (coincide con el período seco), ha crecido grandemente, la alternativa más viable ha sido la perforación de pozos profundos, como una fuente auxiliar importante para suplir la demanda de agua en el período seco, especialmente, en las cuencas con más demanda de agua, como: El Acomé y El Coyolate. Proporcionalmente, se ha reducido el uso de los ríos, sin embargo, los conflictos sobre su uso continúan y continuaran, especialmente, en los años donde la lluvia sea más escasa, a causa de fenómenos como el ENSO, principalmente, en su fase cálida (El Niño).





Nota: **Ríos**, fuente que extraída por gravedad o bombeo. Aguadas o **Norias**, fuente explotada en el estrato bajo y litoral, es una perforación en el suelo rectangular, el cual el agua subterránea emerge según nivel el freático existente, el agua que se almacena ocupa un área de 100 m² a una profundidad de aproximada de 4 m. **Pozo artesanal**, fuente utilizada cerca del litoral, no mayor de 10 m de profundidad, se utiliza para regar áreas menores a 20 has. **Pozo profundo**, perforación profunda de 100 a 300 m con rendimientos hasta de 160 lps. Aguas servidas, fuente que se deriva de la producción de azúcar (ingenios), se utiliza principalmente, en área cercanas al ingenio.

Fuente: Castro L. O. (2015)

Figura 2.19. Uso de fuentes de agua en la zona cañera de Guatemala.

2.6.1.2. Oferta y demanda del recurso hídrico

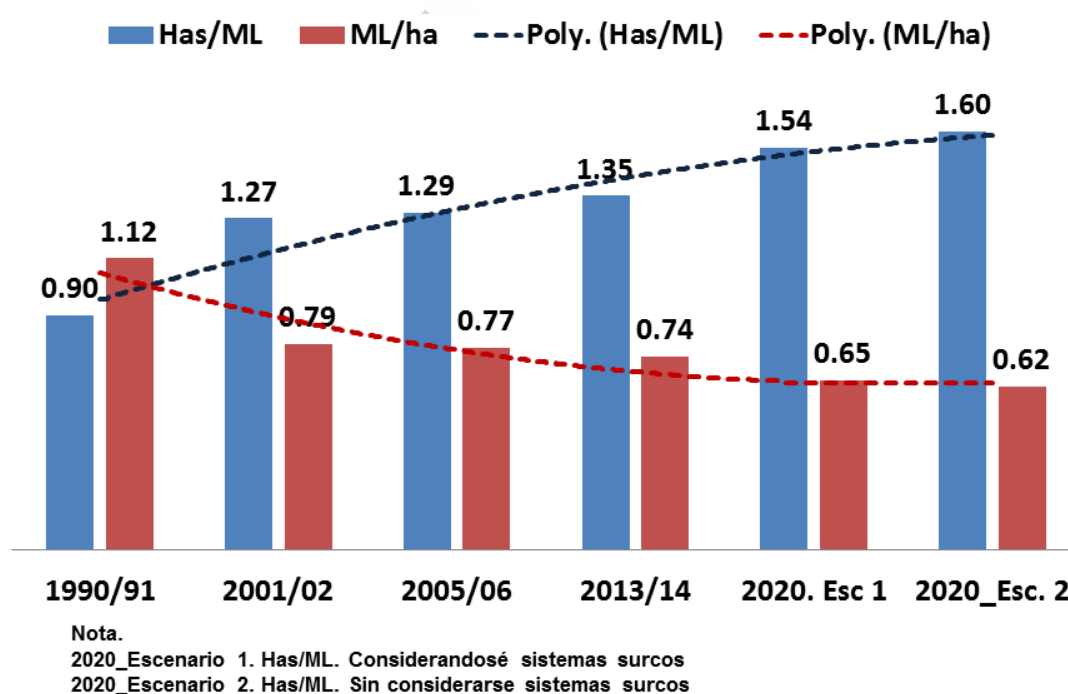
En cuanto a la oferta y demanda del recurso hídrico en la vertiente del pacífico, es variable en el tiempo y el espacio.

La oferta es mayor en septiembre cuando la demanda de agua para uso industrial y agrícola es menor. Los problemas de oferta son mayores en los meses de abril y mayo, los usuarios aguas arriba se abastecen de agua sin ninguna estructura de aforo por lo que no cuantifica la cantidad de agua a tomar, lo que ocasiona que los usuarios aguas abajo no tengan la certeza de utilizar el agua en los meses indicados, no existe organización en pro del recurso hídrico de los usuarios que se ubican aguas arriba y aguas abajo.

Los estudios de oferta de agua constituyen una gran debilidad, debido que la cuantificación de los volúmenes de agua es muy escasa, no existe una red que permita establecer los volúmenes utilizados arriba y abajo de las cuencas. En la década de los noventa, el riego por

gravedad utilizaba el equivalente a una lámina bruta de 112 mm/riego (1,120 m³/ha), en la actualidad este método se utiliza muy poco en la zona cañera. El método de riego por aspersión vino a sustituir en gran medida al método por gravedad en esa década, el método de riego por aspersión utilizaba el equivalente a una lámina bruta de 88 mm/riego (880 m³/ha), Castro O, (2003).

En la Figura 2.20 se analiza el uso del agua a nivel de parcela y los escenarios que se esperan para el 2020, Como indica Castro O, (2015), es importante destacar que en la medida que en la actividad del riego se utilicen sistemas más eficientes, las cantidades de agua se reducirá y se incrementará el área de riego.



NOTA: La lámina bruta calculado con una lámina neta de 50 mm

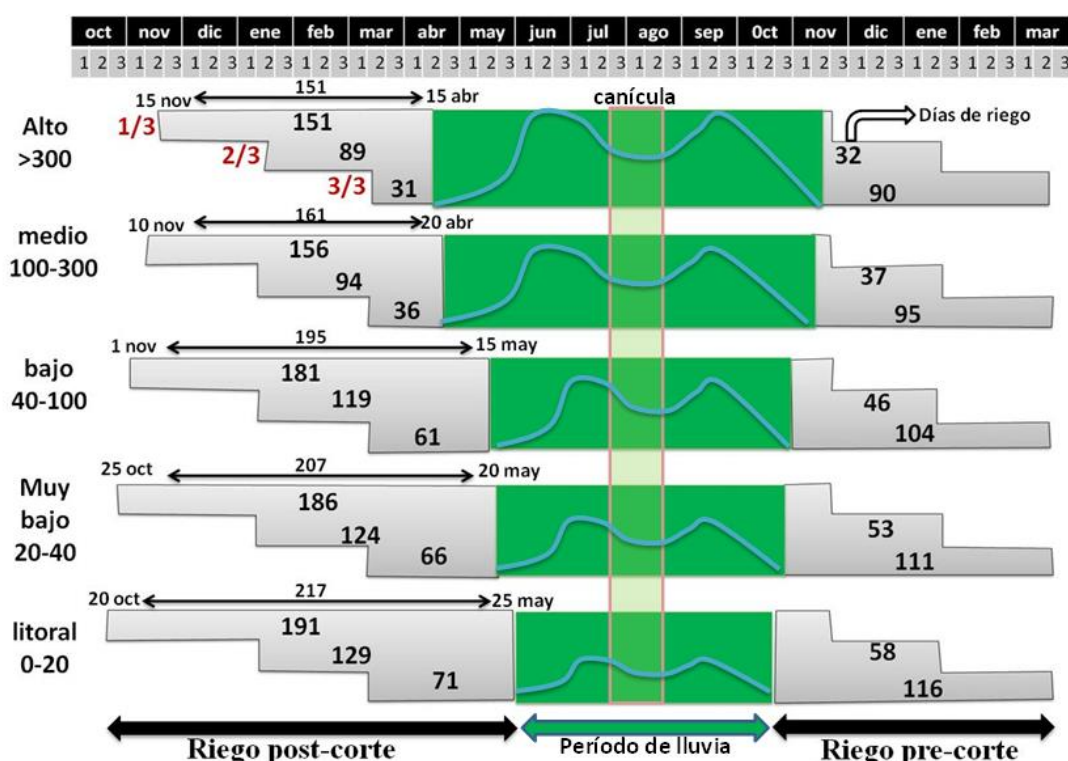
Un megalitro= 1000 m³

Fuente: Castro L. O. (2015)

Figura 2.20. Uso del agua a nivel de parcela y escenarios para el 2020 en la zona cañera guatemalteca

2.6.2. Época y tipos de riego

En la Figura 2.21 se presentan las épocas en la que se realiza el riego en la zona cañera Castro L. O. (2012), como se observa, en cada uno de los estratos altitudinales, el inicio y el final del periodo de riego difiere según el comportamiento de la lluvia (color verde). Como ejemplo, en el estrato alto, en promedio, el inicio del riego post corte del primer tercio de zafra (1/3) inicia el 15 de noviembre, en el segundo tercio (2/3) el 15 de enero y en el tercer tercio (3/3) el 15 de marzo de cada año. En los tres tercios el riego termina el 15 abril, período promedio en el que se inician las lluvias. En el caso del riego pre-corte en el estrato alto solo se presenta en el segundo y tercer tercio de zafra. De la misma manera, se analiza para cada uno de los estratos altitudinales, la época y los tipos de riego.



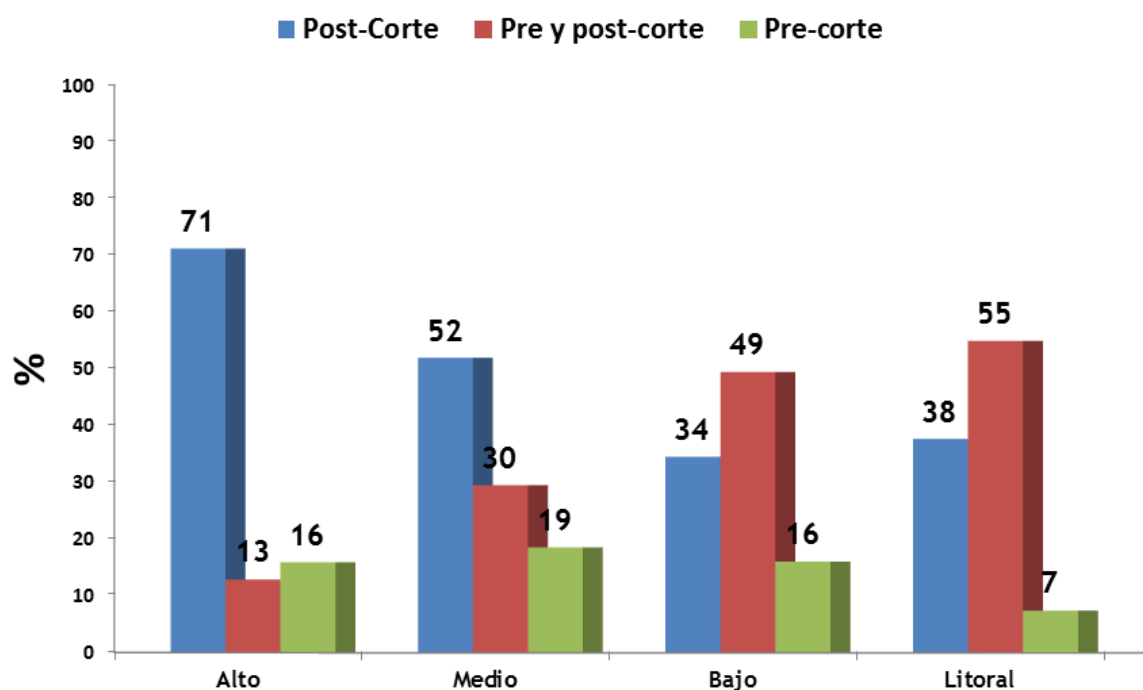
Notas: 1. Desde el punto de vista de riego se definen cinco estratos altitudinales. 2. En riego pre-corte, el cálculo del número de días se realizó con 30 días antes del corte. En los casos de corte de 45 días antes, restar 15 días.

Fuente: Castro L. O. (2012)

Figura 2.21. La interacción entre épocas y tipos de riego en cada uno de los estratos de la zona cañera guatemalteca.

Según la época de realización de la siembra o corte de la caña, se realizan dos tipos de riego, conocidos como post-corte y riego pre-corte. En el caso del riego post-corte se observan en los tres tercios de zafra, mientras que el riego pre-corte, solo se observa en el

segundo y tercer tercio de zafra. También en las siembras o cortes del segundo y tercer tercio se aplican los dos tipos de riego. En la Figura 2.22 se visualiza para cada tipo de riego, los porcentajes de aplicación según el estrato altitudinal. Para el caso del riego pre-corte su importancia va del estrato alto al estrato bajo y litoral, mientras que la combinación de estos dos tipos de riego su importancia va del estrato litoral al estrato alto.



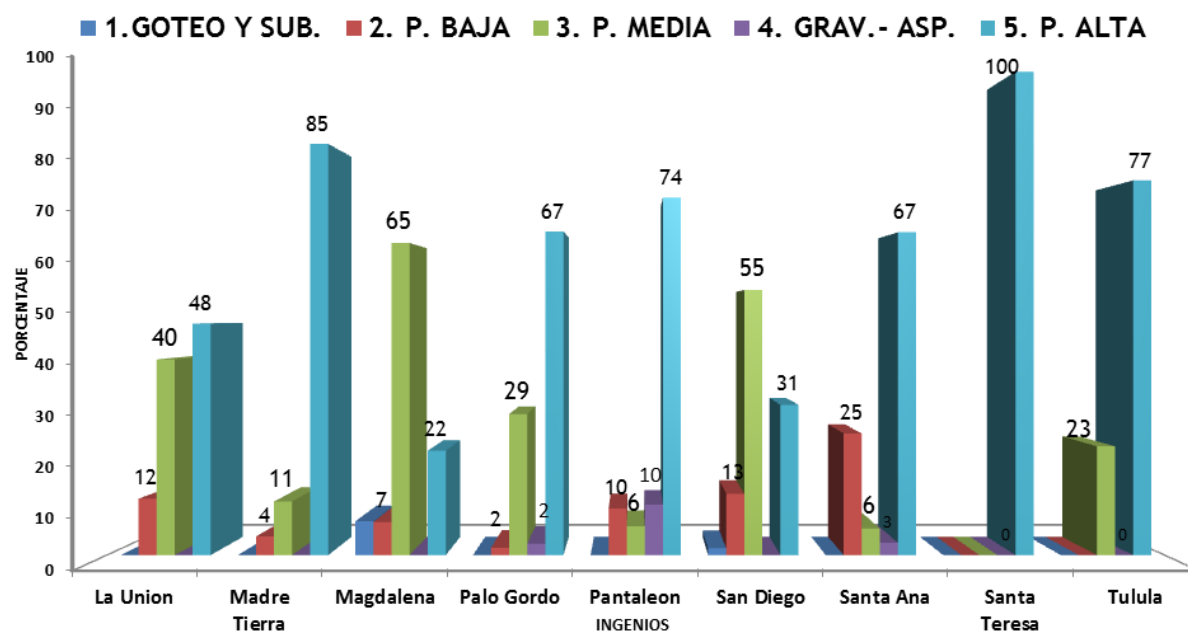
Comité de riegos/zafra 2014-2015

Figura 2.22. Porcentajes de aplicación y la importancia de los tipos de riego que se realizan en la zona cañera de Guatemala.

2.6.3. Métodos y sistemas de riego utilizados

En la actualidad del riego de la zona cañera, basado en la información de la zafra 2014/2015, el método predominante es el presurizado, de los cuales, el sistema que opera con presión alta, conocido como tipo cañón, es el que más se ha utilizado en las últimas décadas en todos los ingenios azucareros de Guatemala, tal como se observa en la Figura 2.23, en la actualidad los ingenios: Magdalena y San Diego ya utilizan los sistemas de mediana presión como los sistemas predominantes. Mientras que el ingenio Santa Ana, es el que más utiliza sistemas que operan con presiones bajas. El método de riego localizado, con el sistema de riego por goteo, su crecimiento no ha sido importante, debido a que los

proyectos ejecutados a la fecha no han considerado una serie de factores técnicos, derivados de las condiciones del clima, suelo, etapa fenológica y operación del sistema.



Nota

Sistemas de riego Presurizados

1. P. Alta: Sistema Presión Alta (>4 Kg/cm²): Aspersión tipo cañón.
2. P. Media: Sistema Presión Media (2.5 a 4 Kg/cm²): Mini-Aspersión
3. P. Baja: Sistema Presión Baja (<2.5 Kg/cm²) : Pivotes y avances.
4. Grav-asp.: Sistema Gravedad Aspersión: utiliza la energía por gravedad, sistemas de Pantaleón.
5. Goteo y Sub: Goteo y subirrigación.

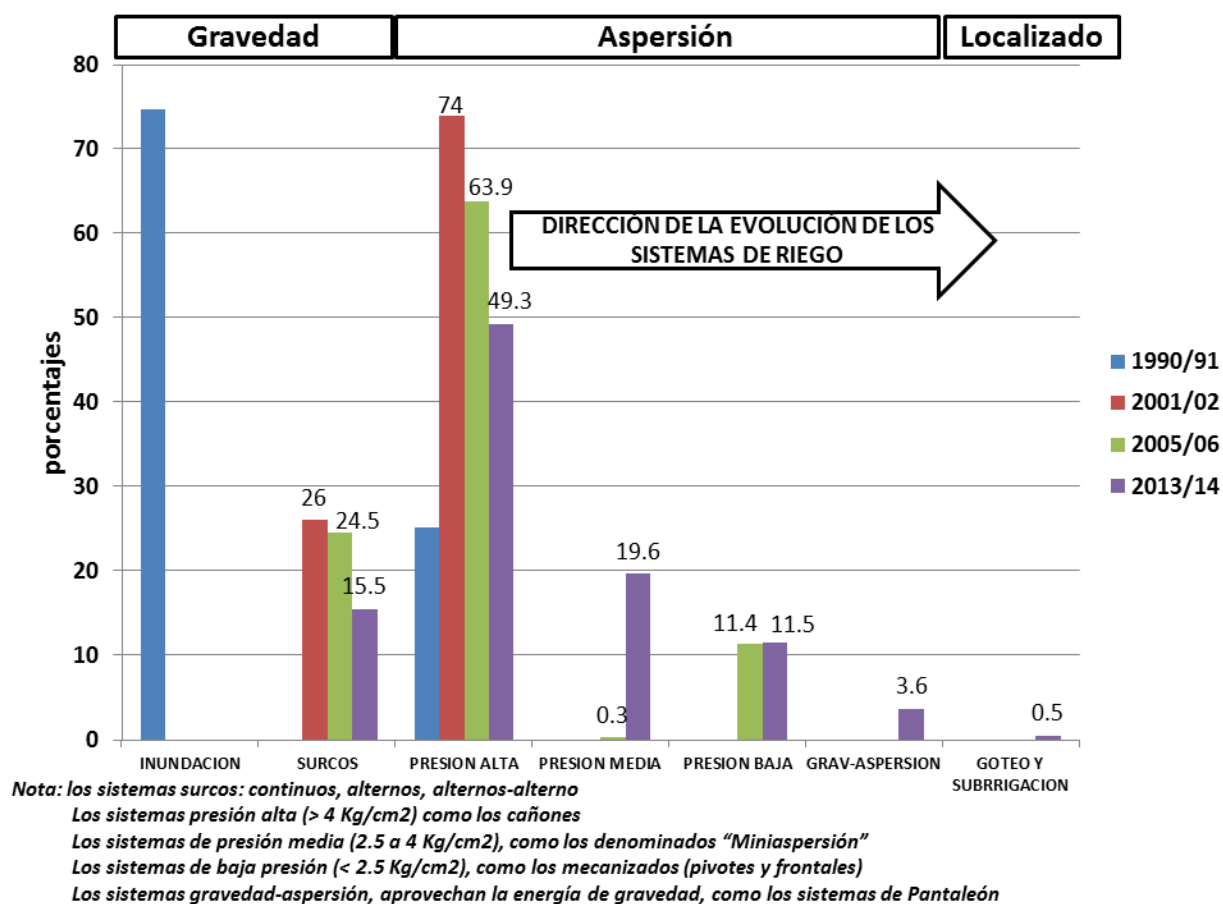
Fuente: Comité de riegos/ zafra 2014-2015

Figura 2.23. Sistemas presurizados que se utilizan en cada uno de los ingenios de la agroindustria azucarera guatemalteca.

2.6.4. Evolución de los métodos y sistemas de riego

Como se observa en la Figura 2.24, de los tres métodos que operan en la zona cañera, el método presurizado o aspersión es el que más ha evolucionado en la zona cañera de Guatemala, debido a la eficiencia del uso del agua, mayor a 70%; en relación al método de gravedad que opera con una eficiencia entre 40 a 50%. En la actualidad, las áreas que se riegan todavía por el método de gravedad (15.5%), se realizan dado a la disponibilidad del recurso agua, facilidad de manejo y bajo costo en la operación, aunque se riegue menos hectáreas por día.

Dentro de la dirección de la evolución del uso del método de aspersión, Castro L. O. (2014), los sistemas de mediana y baja son los más prometedores debido a su eficiencia (>75%) y economía. En los sistemas de presión media, el sistema conocido en el ámbito técnico como “Mini- aspersión” (nombre asignado, debido a su comparación con el sistema tipo cañón), dicho sistema es el más utilizado, desplazando a los sistemas de alta presión tal como se observa en la Figura 2.24.



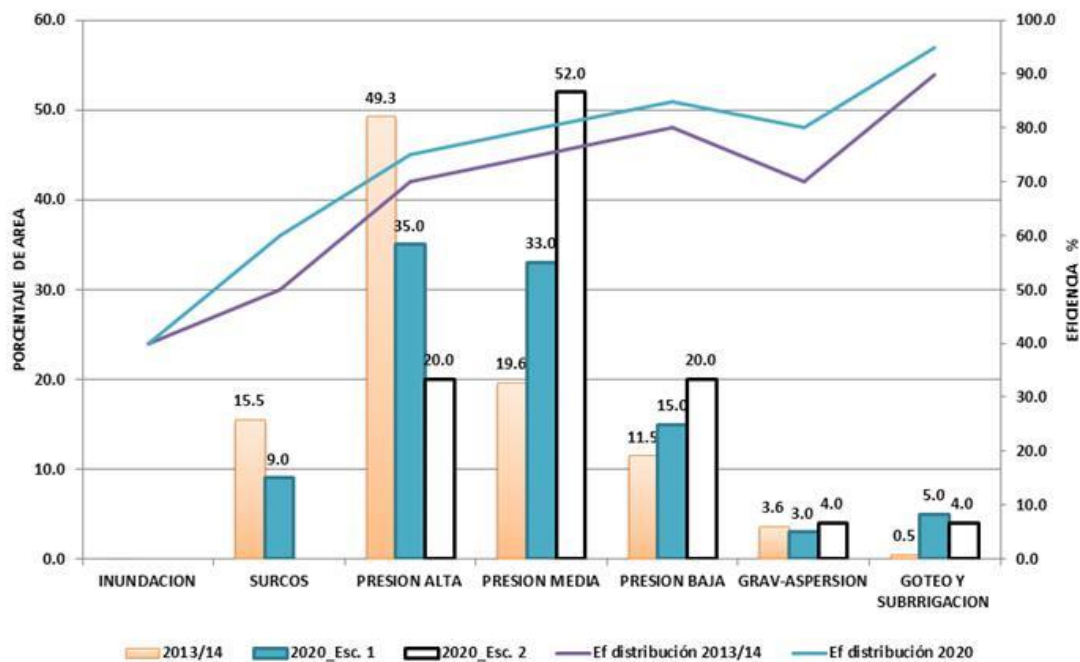
Fuente: Castro L. O. (2014)

Figura 2.24. Evolución de los métodos y sistemas de riego en la zona cañera de Guatemala

2.6.5. Visualización del riego para el 2020

En un ejercicio realizado por el Comité de riegos (aglutina técnicos de la industria azucarera especializados en la administración de las actividades del manejo del recurso hídrico con fines de riego) en la zafra 2013/2014 se visualiza para el año 2020 dos escenarios:

- (i) Se considera aún el método por gravedad (solo en el 9 por ciento del área) destinada al riego con especificaciones sobre su uso, donde se destaca, el uso del método con sistemas de surcos tecnificado y se restringe solo utilizarlo en cada una de las cuencas para los meses de noviembre a enero, debido a que en ese período la oferta de agua es más alta. Además el escenario uno, considera incrementar los sistemas de mediana y baja presión, tal como se observa en la Figura 2.25.
- (ii) Este escenario, implica la desaparición del método de gravedad, tomando como justificación, la baja eficiencia del uso del agua (< 50 por ciento), así mismo, la reducción significativa de los sistemas de alta presión, llevándolo de 49 a 20 %, en este escenario, se considera el crecimiento de los sistemas de mediana presión, como los conocidos como “Mini-aspersión” crezcan del 19.6 al 52%, mientras que los sistemas de baja presión, como los pivotes fijos, crezcan del 11.5 al 20% , como se visualiza en la Figura 2.25. En el escenario dos, considera que los sistemas conocidos como “Gravedad aspersión” y el sistema de goteo, se utilicen en áreas técnica y económicamente viables.



2020_Esc. 1. Escenario uno que considera un porcentaje de sistemas surcos

2020_Esc. 2. Escenario dos que no considera los sistemas surcos

Fuente: Castro L. O. (2015)

Figura 2.25. Visualización del uso de métodos y sistemas de riego para el 2020 en la zona cañera guatemalteca.

2.7. LOS SISTEMAS DE RIEGO PIVOTE

Los sistemas de riego pivote, consiste en una tubería lateral, de acero galvanizado, que gira entorno a un punto fijo en el centro de la parcela regada; de ahí, su denominación de “pivot”, semejante a su denominación inglesa de “Center pivot Laterals”, Pereira,L.S., (2010).

2.7.1. Origen y evolución del sistema pivote fijo

Shelli Hays, (2010), indicó que el pivote fue patentado con el nombre "Aparato Zybach Autopropulsada Riego por Aspersión", el 22 de julio de 1,952 y su inventor fue un productor de Strasburg, Colorado, EE.UU llamado Frank Zyback. La patente describía un nuevo aparato como una serie de torres móviles que llevaban una tubería alrededor de un pivote, rociadores en la tubería que distribuían el agua directamente al cultivo (The Fence Post Magazine. Retrieved Junio 6, 2012). Según la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos (ASABE), reconoce al pivote central de riego como “Un hito histórico de la ingeniería agrícola”.

Tharran, (2,015), menciona que Robert Daugherty, el fundador de Valley Manufacturing en Valley, Nebraska, dos años más tarde, adquirió la patente y desarrolló un producto comercial que inicio en 1,954. Según los historiadores en Wessels Living History Farm en York, Nebraska, Valley tuvo el mercado de los pivotes gran parte de la década de 1950 y 1960, hasta que la patente expiró en 1,969. A pesar de las ventajas que un sistema de pivote central ofrecía, era todavía muy pronto para que la industria del pivote central se moviera como un todo en gran parte de ese tiempo. De hecho, sólo siete máquinas de pivote central se construyeron en 1,955. Para 1,960 la producción seguía siendo limitada a unas 50 unidades al año.

Thaxco, (2,009), indica que en 1,975 aparecieron los primeros equipos alimentados mediante electricidad. Posteriormente, los tubos se comenzaron a galvanizar en caliente y a finales de los 80 se empezó a pensar en disminuir la presión de trabajo para ahorrar energía.

Wikipedia, (2,015), describe los pivotes de la siguiente manera “Los sistemas de pivote central riegan superficies de grandes dimensiones de forma circular. Se emplean en sitios donde el agua es un factor fuertemente limitante. También en campos donde se desea aumentar la eficiencia del riego, aprovechando mejor el agua y aumentando fuertemente los rendimientos de los cultivos.

La eficiencia en el riego por pivote es de un 85% a 90%. Es un sistema que se adapta a las ondulaciones del terreno (este no necesita ser plano). Dependiendo del fabricante y del diseño del equipo se pueden utilizar en terrenos con hasta un 30% de pendiente (T-L Irrigation Co www.tlirr.com).

La distribución del agua a lo largo de la estructura la realiza el fabricante seleccionando el tamaño y la separación de los aspersores. Los aspersores ubicados cerca del centro del pivote necesitan entregar menor cantidad de agua que aquellos ubicados hacia el final. Con las nuevas tecnologías en aspersores para pivotes, los fabricantes han logrado bajar aún más la presión de operación de los aspersores (hasta 6-10psi =0,42-0,7bar); y con ello, la presión de operación de los pivotes (y el consumo de energía).

La mayor proporción del mercado mundial de riego por pivote son de accionamiento eléctrico, ya que existen diversos fabricantes (Irrifrance, Chamsa, RKD, Valley, Pierce, Rokking, Reinke, Bauer). El saldo es de accionamiento hidráulico fabricado por T-L Irrigation Co (Hastings, Nebraska USA)”.

2.7.2. Características del sistema pivote fijo

Valín, (2006), indica que un sistema pivote (Figura 2.26) es un lateral que gira sobre un punto fijo (centro del pivote), por donde recibe agua y energía eléctrica, describiendo un movimiento circular. Los sistemas están constituidos por:

- (i) La *tubería de alimentación*, desde el punto de captación de agua al centro del pivote. El abastecimiento puede ser efectuado por aguas superficiales, siendo necesaria en ocasiones una balsa de regulación, o por aguas subterráneas. La fuente de agua utilizada condiciona el equipo de bombeo.
- (ii) *El centro del pivote*, es el eje de rotación, corresponde a un eje vertical que abastece el lateral.
- (iii) La *tubería portaemisores o tramo*, donde se colocan los emisores, su longitud varía entre 30 y 50 m, y los diámetros entre 114,3 y 254 mm dependiendo del tamaño del área regada, que varía entre 10 y 200 ha, en función del número de tramos del sistema. Los sistemas pueden estar equipados con 2 tipos de emisores: aspersores de impacto y difusores (Tarjuelo 1999, Allen *et al.* 2000, Pereira 2004a). En ocasiones se instala un cañón en la extremidad para aumentar el área regada.

- (iv) Las *torres*, son estructuras metálicas motorizadas en forma de A, donde se apoya la estructura del sistema, son responsables del movimiento.
- (v) Los *elementos de soporte*, estructuras trianguladas que soportan las cargas de las tuberías portaemisores y las transmiten a las torres.

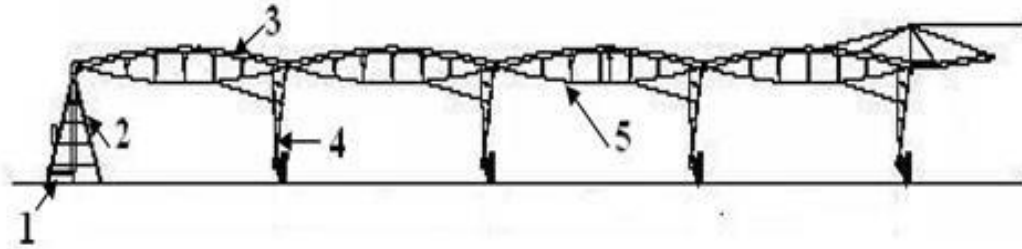


Figura 2.26. Esquema de las diferentes partes que componen un sistema pivote: 1) Tubería de alimentación; 2) centro del pivote; 3) tubería porta-emisores o tramo; 4) torre; 5) elementos de soporte (RKD, 2005)

La velocidad de avance se determina actuando sobre el motor de la última torre. Cada torre tiene su propia unidad motriz, lo que permite que se desplace con velocidades lineales diferentes. La distancia lineal recorrida por cada torre aumenta conforme aumenta la distancia al centro pivote, por lo que la última torre se desplaza con una velocidad lineal superior a fin de mantener constante la velocidad angular, consiguiendo que todo el sistema gire como un todo continuo (Pereira, 2010). En el panel de control se fija la velocidad porcentual, es decir la fracción del ciclo (anda-para) en que la última torre se está desplazando. La velocidad máxima se expresa porcentualmente y corresponde al valor del 100%, representando las otras velocidades la relación del ciclo. Un ciclo suele tener una duración de 1 minuto.

2.7.3. Emisores

Uno de los aspectos más importantes a la hora de diseñar un sistema es la elección de los emisores a colocar, para que todos los puntos del terreno reciban la misma cantidad de agua. Cada metro de lateral riega una corona circular mayor que el anterior y permanece un tiempo menor sobre el mismo punto. Para que esto no se traduzca en una baja uniformidad es necesario escoger adecuadamente el caudal y la separación entre emisores. Los modelos de aplicación de agua usados a lo largo de todo el lateral son:

- (i) Separación uniforme entre emisores, aumentando proporcionalmente el caudal hacia el final del lateral. La anchura mojada aumenta pero no de forma proporcional al aumento del caudal. Esta distribución es adecuada para los aspersores de impacto de alta presión, que presentan una anchura mojada elevada, admitiendo separaciones entre los

9 y 12 m. Tabuada *et al.*, (2004) afirman, basados en datos experimentales, que la uniformidad de distribución es mayor cuando los emisores están colocados sobre el ramal de forma equidistantes.

(ii) Separación variable entre emisores, disminuyendo hacia el final del lateral, lo que permite instalar emisores de igual caudal. Es frecuente la adopción de este modelo en difusores. Generalmente la separación entre emisores es de 12 m al inicio del lateral pudiendo llegar a los últimos tramos con una separación de 1,5m.

(iii) Separación semiuniforme entre emisores. El lateral es dividido en segmentos, donde la separación entre emisores es constante y la pauta seguida es el aumento del caudal, disminuyendo la separación en los tramos más próximos de la extremidad.

2.7.4 Los sistemas de riego pivote en la zona cañera de Guatemala

Dentro de los sistemas mecanizados, el pivote central fijo es el que más se ha ajustado a las exigencias del riego en la zona cañera de Guatemala, debido a su versatilidad tanto en el riego post-corte y en el riego pre-corte.

Los resultados del censo realizado en la zafra 2,014/15 con el apoyo directo del comité de riego, indican que los sistemas pivotes se agrupan dentro de los sistemas mecanizados (presión baja) y ocupan el 11.5% del total de los sistemas que se utilizan en la zona cañera guatemalteca.

Se registró un total de 61 unidades de sistemas pivote, de los cuales 49 son fijos (80 %) y únicamente 12 de estos sistemas son móviles (20%). En los sistemas fijos el 69% son sistemas de propulsión electrónica, el resto de propulsión hidráulica.

El número de torres de la mayoría de pivotes tienen entre 9 a 11 torres, por lo que la longitud fluctúa entre 450 a 550 m (50 m entre torres) sin considerar el largo del voladizo.

El 69% de los pivotes se ubican en el estrato litoral, especialmente, en suelos con predominancia de arena en el perfil del suelo.

En el 100% de los casos, el programa de riego en los pivotes fijos se realiza con frecuencias, láminas y tiempos fijos durante toda la temporada de riego. En promedio se aplica una lámina de 15 mm/riego y con una frecuencia de 3 días.

Las producciones de caña obtenidas al utilizar sistemas de pivotes fijos comparado con el sistema de aspersión tipo cañón, en términos generales, fluctúan entre 10 a 30 TCH más. El costo del riego con pivotes está entre un rango de 0.95 a 1.52 US\$/mm/ha.

Las recomendaciones están dirigidas a mejorar la operación a través del diseño agronómico, establecimiento de un programa de seguimiento de la calidad del agua, realizar en cada una de las temporadas de riego un plan de evaluación, mantenimiento y mejora del sistema de riego y utilizar el balance hídrico. (CENGICAÑA, 2014).

2.8. LA LABOR DEL CENTRO GUATEMALTECO DE INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR (CENGICAÑA).

El Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar fue creado por la Asociación de Azucareros de Guatemala en 1992, para apoyar el avance tecnológico de la agroindustria azucarera, con el objetivo de mejorar la producción y la productividad del cultivo de la caña de azúcar y sus derivados. Es financiado por los ingenios que conforman la agroindustria azucarera de Guatemala, que hacen sus aportes al presupuesto del Centro proporcionales a la producción de azúcar.

De acuerdo con el Plan Estratégico 2005-2015 la visión de Cengicaña es “Ser líderes en generar tecnología para incrementar la competitividad de la Agroindustria Azucarera en la región”, y la misión: “Ser la organización de la Agroindustria Azucarera responsable de generar, adaptar y transferir tecnología de calidad para su desarrollo rentable y sostenible”.

El Centro tiene como objetivos estratégicos:

- (i) Aumentar la rentabilidad y sostenibilidad de la Agroindustria Azucarera.
- (ii) Evaluar e implementar nuevos programas de investigación en fábrica cogeneración y coproductos.
- (iii) Mejorar la transferencia de tecnología a los ingenios asociados.
- (iv) Asegurar la satisfacción de los asociados con tecnologías para mejorar la rentabilidad y la sostenibilidad y
- (v) Desarrollar un programa continuo de educación, formación y actualización del personal técnico de Cengicaña y la Agroindustria Azucarera.

Para el caso particular del riego en la zona cañera de Guatemala ha aumentado, como se muestra en la Figura 2.27, pero el apego a las recomendaciones técnicas y económicas para la aplicación del riego ha aumentado la eficiencia en la utilización del agua, como se observa en la Figura 2.28.

Se ha avanzado también con la aplicación de otras tecnologías que incrementan la producción, como: uso de balance hídrico, programación de riego precorte (riegos que se planifican para las siembras o corte de marzo y abril, se realizan antes del corte).

El número, frecuencia, lámina y tiempo son dependientes del comportamiento de la lluvia de noviembre, diciembre y enero), análisis de la calidad del agua, aporte del agua capilar y el manejo de vetas arenosas.

Se ha reportado la ampliación de áreas con sistemas mecanizados de riego, como pivotes fijos y pivotes móviles y desplazamiento frontal, y mayor número de sistemas por aspersión. El uso de estos métodos de riego innovadores varía de acuerdo con la eficiencia en el uso del agua, facilidad en el manejo y costo operación y de inversión.

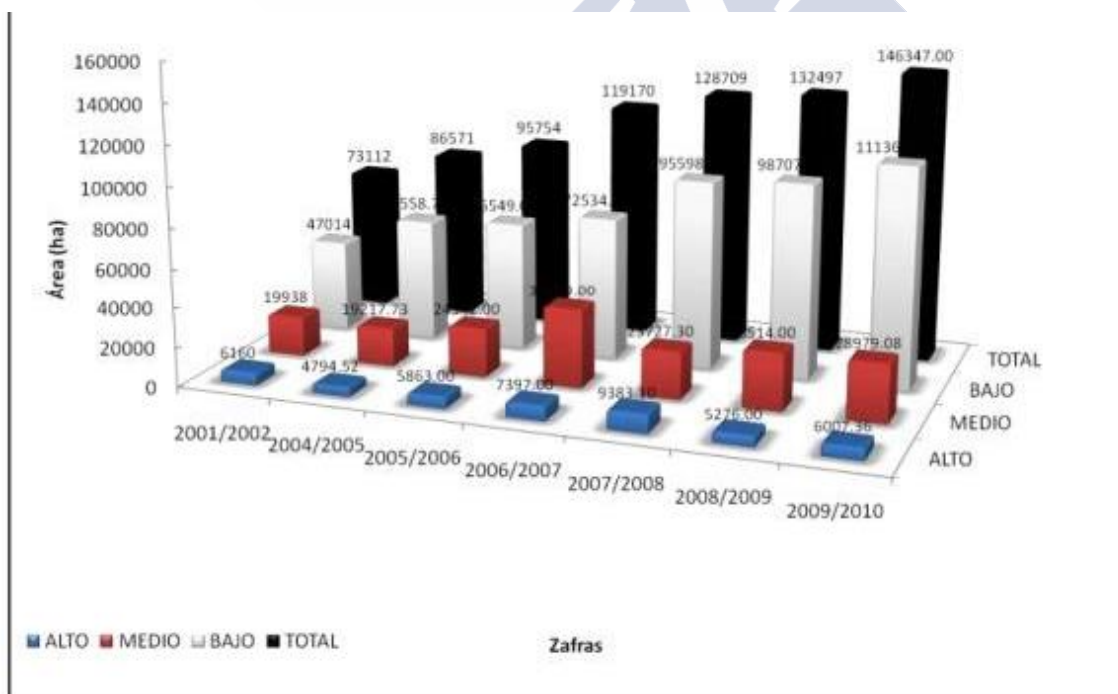


Figura 2.27. Crecimiento del área bajo riego 2001-2010, por estrato altitudinal bajo (1-100 msnm), medio (100-300 msnm) y alto (más de 300 msnm) Fuente: CENGICANA 2011. Situación actual y proyección de la producción de azúcar Zafra 2010/2011. Presentación en PowerPoint a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.

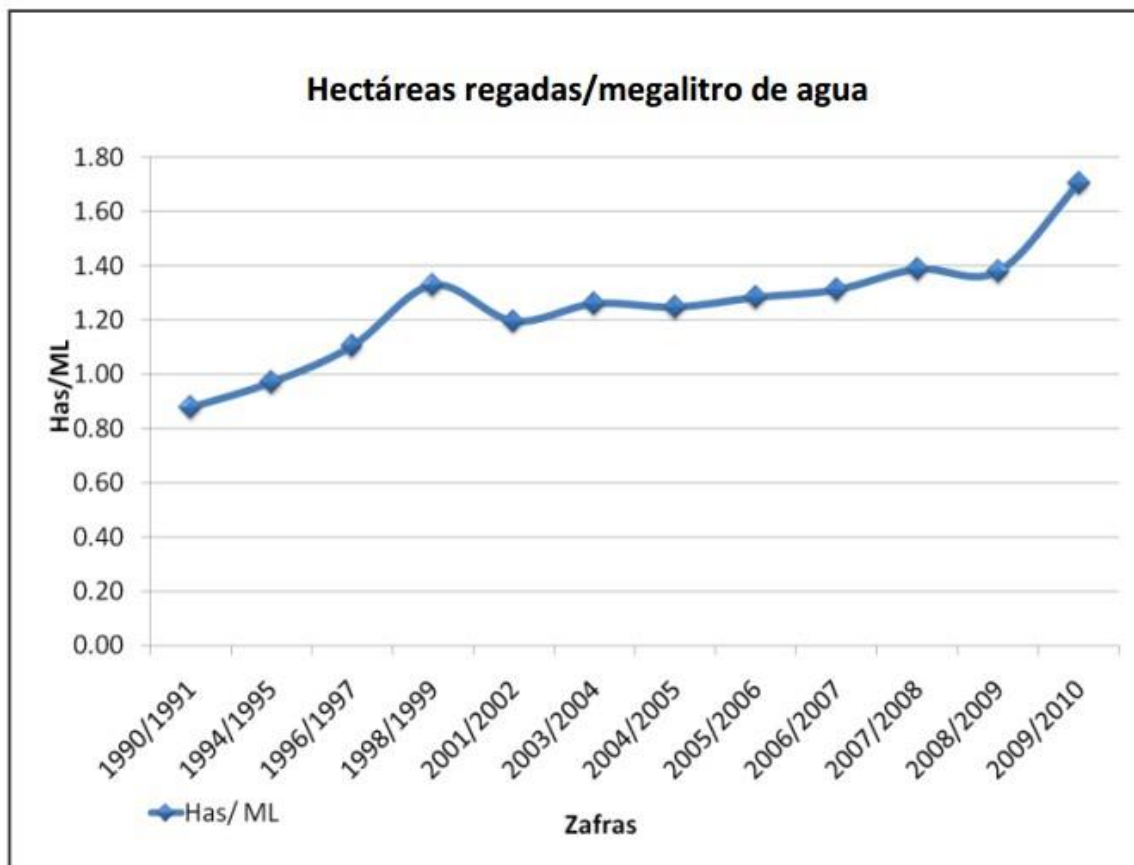


Figura 2.28. Evolución de la eficiencia en riego Fuente: CENGICANA 2011. “Situación actual y proyección de la producción de azúcar” Zafra 2010/2011. Presentación en PowerPoint a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.

2.9. EL BALANCE HÍDRICO COMO UN MODELO PARA GOBERNAR EL RIEGO A NIVEL DE PARCELA

Pereira, L.S, (2010), indica que el conocimiento del balance hídrico del suelo en la zona radicular es fundamental para una buena gestión del agua en regadío. Indica que para un manejo adecuado del riego, es necesario responder a tres preguntas: ¿cuándo, cuánto y cómo regar?. La respuesta dependerá del grado de conocimiento de los procesos ligados a las transferencias hídricas en la zona de enraizamiento del cultivo regado entre las plantas, el suelo y la atmósfera. También indica, que el cultivo es el objetivo de interés, por lo que las manifestaciones fisiológicas de las plantas debidas al déficit hídrico deberán servir como indicadores para determinar cuándo regar.

Estos indicadores fisiológicos pueden tener carácter empírico, como los relativos al aspecto vegetativo del cultivo (color, enrollamiento de las hojas, etc.) o constituir métodos científicos, como los relativos al potencial del agua en las hojas y la temperatura de la cubierta vegetal. Por otro lado, podrán servir de modelo para la calibración práctica de los métodos basados en la medición de los procesos que se producen en un medio donde el cultivo se desarrolla, la atmósfera y el suelo. Son ejemplos, la medición de flujo de la savia para estimar la tasa de transpiración del cultivo, la utilización de mediciones de variables meteorológicas para estimar la ET del cultivo, la observación de la tasa de variación del contenido de agua en el suelo (por métodos como el gravimétrico, de la sonda de neutrones o de la reflectometría en el dominio del tiempo (“Time Domain Reflectometry”, TDR), o del potencial del agua en el suelo (por ejemplo, utilizando tensiómetros). En todos los casos, las variables observadas permiten optimizar la decisión relativa a la oportunidad del riego, siempre que los métodos estén calibrados o validados para el cultivo y el ambiente donde éste se desarrolla.

El manejo del riego deberá entenderse como la combinación óptima entre las necesidades hídricas del cultivo, las características del suelo, tanto como medio de transporte como de almacenamiento de agua, y la aplicación del agua a la parcela, con sus condiciones técnico-económico y social. Por eso, el conocimiento de lo que sucede al agua en el suelo es importante en la gestión del riego. La determinación del balance hídrico del suelo en la zona de enraizamiento, con la respectiva cuantificación de los términos que lo constituyen, y la caracterización de los modelos de los procesos de transferencia hídrica (modelos de extracción radicular y de escorrentía del agua en el suelo), es una necesidad determinante para la gestión del riego, para su mejora y optimización, Pereira L.S., (2010).

2.9.1. Formulación del balance hídrico general

La ecuación general del balance hídrico en la zona de enraizamiento (ver Figura 2.29), para un intervalo de tiempo Δt (días), y para una capa de suelo de espesor Δz (m), correspondiente a la zona de enraizamiento, es dado por Pereira L.S., (2010):

$$(\Delta S + \Delta V) = (P + I + GW) - (Q_r + DP + E + T) \text{-----} [2.1]$$

Dónde: ΔS , es la variación de la reserva de agua en el suelo; ΔV , es el incremento de agua incorporada en las plantas (el agua de constitución). Como entradas: P es la precipitación; I, es la dosis de riego; GW, es el flujo acumulado de ascensión capilar en el período Δt ; Como salidas: Q_r , es la escorrentía superficial en ese mismo período; DP, es el flujo acumulado de drenaje por percolación profunda; E, es la evaporación a partir del suelo; y T, es la transpiración de las plantas.

La ecuación [2.1], se aplica entre la superficie del suelo y una profundidad Z_r (Figura 2.29), para cualquier intervalo de tiempo Δt . Todas las cantidades referidas en la ecuación [2.1], se expresan en volumen por unidad de área (L^3/L^2), siendo más común en mm (acumulados para el intervalo Δt).

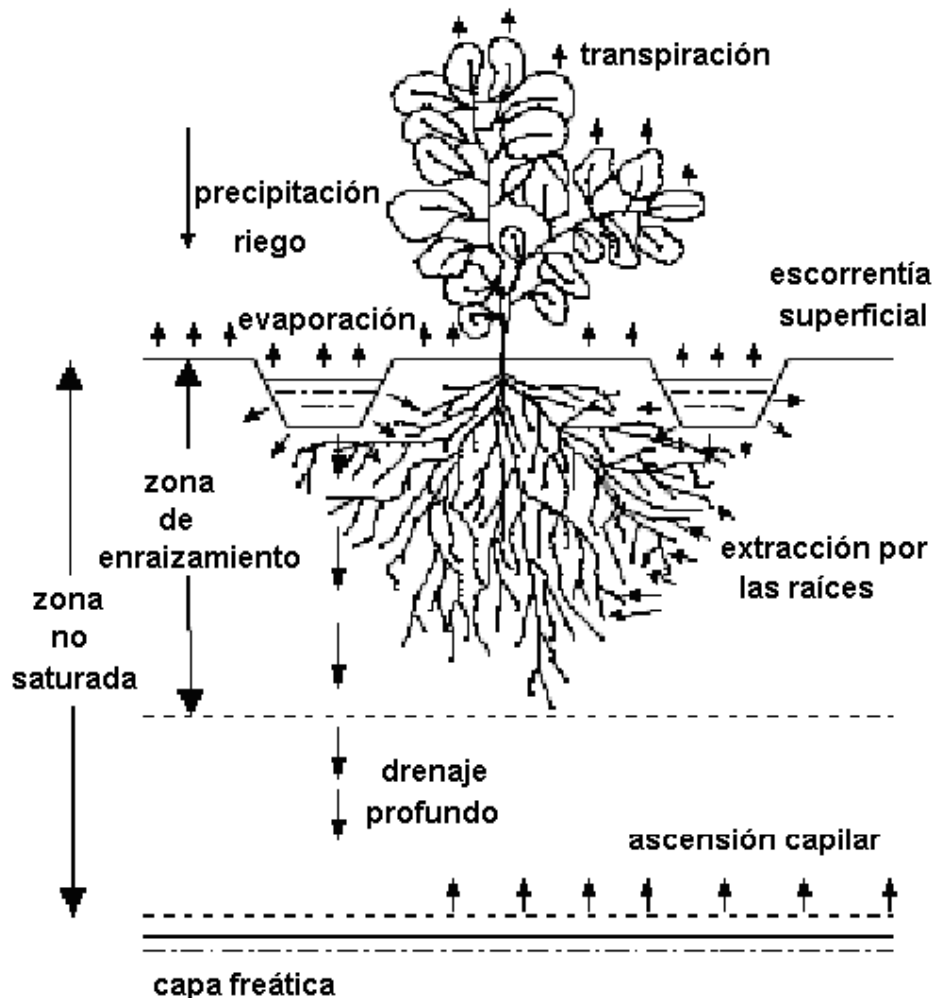


Figura 2.29. Esquema de los términos del balance hídrico de la zona de enraizamiento, Pereira L.S, (2010)

2.9.2. Determinación de los términos de balance hídrico general

La precipitación se determina fácilmente; es la medida realizada con pluviómetros, pueden ser utilizados registros de estaciones meteorológicas próximas al lugar de estudio, que representen el área.

La medición de **la dosis de riego** puede representar algunas dificultades, especialmente en riego por superficie y por aspersión, debido a la gran variación de la geometría del itinerario del agua que tiene que recorrer (variación de la sección, rugosidad de la superficie), a las variaciones de la tasa de infiltración del suelo, a las “pérdidas” por infiltración en las regaderas o en las tuberías y a las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento (aspersión). Las cantidades infiltradas y retenidas en la zona radicular pueden ser estimadas recurriendo al concepto de eficiencia de riego cuando ésta se registra a través de las evaluaciones de campo.

Los términos de variación de la reserva de agua en el suelo, evaporación, transpiración, ascensión capilar y percolación profunda son los de más difícil determinación. Normalmente, la evaporación y la transpiración determinan la evapotranspiración. La variación de la reserva de agua en el suelo en el intervalo Δt es función del contenido de humedad del mismo (θ), el cual varía en profundidad (z) y en el tiempo (t). Para su determinación, es necesario realizar mediciones de contenido de humedad a diferentes profundidades y en diferentes momentos. El contenido de humedad puede ser medido recurriendo al método gravimétrico, que es un método directo que obliga a la recogida de muestras de suelo y a su pesada antes y después del secado en la estufa. Es más común, y generalmente más fácil y más preciso, recurrir a métodos indirectos como: la termalización neutrónica, cuyo instrumento de medida es la sonda de neutrones, la medición del tiempo que tarda un pulso electromagnético en viajar a través de unos electrodos de metal colocados en el suelo (TDR), tiempo de viaje que es función de la constante dieléctrica del suelo que, a su vez, varía con su contenido de humedad, y/o con la técnica de la Reflectometría en el dominio de la frecuencia (“Frequency Domain Reflectometry”, FDR), basada en la capacitancia, que determina la permisividad dieléctrica del suelo al medir el tiempo de carga de un condensador que utiliza el suelo como un dieléctrico, estando aquella directamente relacionada con el contenido de agua.

El término **drenaje** se utiliza para describir el flujo de agua del suelo por debajo de la zona radicular, mientras que el movimiento del agua en profundidad, a través del suelo, se denomina percolación profunda. **La ascensión capilar y el drenaje**, en pequeñas parcelas de pequeña pendiente, constituyen escurrientías de agua en el suelo con sentido opuesto; son, por esta razón, también, consideradas globalmente con frecuencia. En casos de terrenos con fuertes pendientes, puede existir una componente horizontal del drenaje cuando el contenido de humedad del suelo está próximo a la saturación, lo que creará dificultades en los cálculos.

El agua en el suelo se puede mover en flujo saturado, en flujo no saturado y en forma de vapor. El movimiento del agua en condiciones no saturadas, también, se denomina movimiento capilar e incluye el movimiento de ascensión capilar desde una capa freática.

El flujo de agua líquida (en suelo saturado o no saturado) responde siempre a un gradiente de potencial. En condiciones de saturación, el agua que, por exceso, no puede ser retenida por la matriz del suelo recibe el nombre de agua gravitacional o agua de drenaje.

La conductividad hidráulica es la propiedad hidráulica más importante que afecta al flujo de agua y al transporte de solutos en el suelo. Es importante para determinar las tasas máximas de infiltración (en condiciones de saturación), la capacidad de campo, el flujo de agua en el suelo no saturado, la resistencia al flujo de agua hacia las raíces y el drenaje de un suelo saturado.

2.9.3. Aplicación del balance hídrico para estimar los consumos de agua de los cultivos

La ecuación [2.1], se puede utilizar para determinar la evapotranspiración de un cultivo y evaluar la forma de programar el riego. En este caso, es necesario conocer los flujos de agua en el suelo, pudiendo realizarse varias aproximaciones. La primera aproximación se aplica esencialmente a regímenes de sequía, aunque puede ser aplicada a regadío en períodos entre riegos de bajas dosis; considera que las escorrentías, tanto superficiales, como internas del suelo, son insignificantes ($\Delta V=0$, $Q_r=0$ y $DP=0$). La ecuación [2.1], adopta la forma más simple posible:

$$(\Delta S) = P + I - ETR \dots \dots \dots [2.1.a]$$

Donde: $ETR=T+I$, es la evapotranspiración real del cultivo, la cual depende de la disponibilidad del agua en el suelo; esto es, $ETR=ET_c(\theta)$. Las restricciones siguientes que hacen posible la aplicación de la ecuación [2.1.a].

- (i) Variación insignificante del contenido de humedad en las capas más profundas del suelo; es decir, a la profundidad Z_f no hay variación del contenido de humedad entre los instantes T_2 entre los que se realiza el balance.
- (ii) Bajo valor del contenido de humedad en las capas más profundas (corresponde a tener un valor bajo de la conductividad hidráulica y, por tanto, un drenaje insignificante).
- (iii) Terrenos con poca pendiente y precipitaciones de intensidad reducida.

La ecuación [2.1.a], se puede aplicar a situaciones donde toda el agua de riego, o de la precipitación, se infiltra, pero no hay humedecimiento de las capas más profundas (Figura 2.29). En éstas, la humedad permanece constante, a valores bajos, correspondiendo a situaciones de baja conductividad hidráulica del suelo. Los perfiles de carga hidráulica indican la presencia de flujos de drenaje a la profundidad Z_f , éstos tienen baja intensidad y pueden ser despreciados.

En regadío, rara vez, se utiliza esta aproximación simplificada de ecuación [2.1.a] exceptuando cuando se riega con pequeñas dosis y alta frecuencia. No se aplica en riego por superficie, donde las dosis son elevadas y se produce variación de humedad en las capas más profundas del suelo, siendo frecuentemente la aparición de percolación y pudiendo establecerse un régimen de drenaje permanente. Para cultivos regados y dotaciones altas, es necesario cuantificar los flujos de agua en el suelo, y la ecuación [2.1.a] adopta la forma:

$$(AS) = P + I - E - T - DP + GW \dots\dots\dots [2.1.b]$$

Después del riego, es normal que se produzca drenaje en las capas profundas del suelo o, exactamente, percolación más allá de la zona explorada por las raíces. A medida que la planta va utilizando el agua del suelo, el sentido de la escorrentía se puede invertir y las capas de suelo debajo de la zona radicular pasan a suministrar agua a las capas superiores. Este comportamiento es más evidente cuando existe una capa freática próxima a la zona explotada por las raíces.

2.9.4. La aplicación del balance hídrico en caña de azúcar

Colombia ha sido, uno de los países cañeros, en América Latina, que más ha aplicado y reportado el uso del balance hídrico en caña de azúcar. Definen el balance hídrico como una contabilidad del agua en el suelo que permite comparar las ganancias y las pérdidas de humedad como se observa en la ecuación [2.2].

El suelo aumenta el contenido de humedad cuando ocurre un evento de precipitación (P) o cuando se aplica riego (R). En el campo también ocurren ganancias de humedad por contribución del nivel freático (NF), escorrentía (Es) o por flujo sub-superficial desde áreas cercanas.

Las pérdidas de humedad desde el suelo se deben, principalmente, al agua que transpira la planta (T), a las pérdidas por evaporación desde la superficie del suelo (Ev) y por percolación profunda (Pp). El balance entre las ganancias y las pérdidas de humedad determina los

cambios en el contenido de ésta en el suelo (CHS) durante un período de tiempo determinado Cenicaña, (1995).

Este balance se puede expresar de la forma siguiente:

$$CHS=(P+R+NF)-(Ev+T+Pp) \dots\dots\dots [2.2]$$

$$CHS= P + R + NF + Eta - Pp \dots\dots\dots [2.3]$$

En zonas con nivel freático profundo y asumiendo que no existe percolación profunda, la ecuación [2.3] se puede simplificar como se indica en la ecuación [2.4]:

$$CHS = P + R - Eta \dots\dots\dots[2.4]$$

El contenido de humedad en el suelo y los demás parámetros de la ecuación del balance hídrico se expresan, generalmente, en términos de lámina de agua. Este se define como la profundidad que alcanzaría la capa de agua cuando un volumen dado de ésta se coloca en una superficie impermeable. Así, al colocar un litro de agua en 1 m² se obtendrá una lámina de agua de 1 mm de profundidad, lo que es equivalente a 10 m³ de agua por hectárea.

El cambio que ocurre en el contenido de humedad en el suelo durante un período determinado, se puede estimar a partir de los contenidos de humedad inicial LAS(i) y final LAS(f), expresados como láminas de agua en milímetros, así como se indican en las ecuaciones [2.5] y [2.6]:

$$CHS=LAS(f) - LAS(i)\dots\dots\dots[2.5]$$

$$LAS(f) = LAS(i) + P + R + Eta\dots\dots\dots[2.6]$$

2.9.5. Cálculo del balance hídrico diario/semanal en las regiones cañeras.

- **Colombia**

El cálculo del balance hídrico se hace en forma diaria, semanal o mensual. El balance diario se puede determinar con la ecuación [2.6], en donde la lámina de agua disponible en el suelo para el día siguiente LAS(f) se calcula diariamente restando de LAS(i) la evapotranspiración y sumando la precipitación o el riego aplicado. De esta manera, el cálculo se repite hasta cuando la lámina de agua aprovechable se aproxime a cero, siendo entonces necesario aplicar riego.

El programa de balance hídrico permite conocer en forma aproximada el agua aprovechable en el suelo para cada una de los lotes de caña, y programar los riegos con una semana de anticipación. Si ocurren lluvias durante este período, es necesario reprogramar los riegos.

En un programa de balance hídrico manual o sistematizado, es necesario hacer ajustes periódicos con base en la determinación de la humedad en el suelo. Cenicaña, (1995). También utilizan la ecuación general del balance hídrico para programar el riego a través de las lecturas de pozos de observación para estimar el aporte capilar a partir de un nivel freático localizado entre 1.0 y 1.2 m de profundidad. Al eliminar las pérdidas por percolación profunda en la ecuación [2.6], se obtiene una relación que permite conocer el aporte capilar a partir del nivel freático (NF) como se determina en la ecuación [2.7]:

$$NF = CHS - P - R + E_{ta} \quad [2.7]$$

La posición del nivel freático depende de las condiciones locales que determinan el balance hídrico; por lo tanto, se sugiere construir pozos que permitan observar dicha posición durante el desarrollo del cultivo y, de esta forma, poder predecir el momento oportuno del riego. Cenicaña, (1995).

En el valle del río Cauca, Colombia, se utiliza el balance hídrico como una herramienta importante para la programación oportuna de los riegos en caña de azúcar, principalmente cuando se presentan fenómenos como el conocido “El Niño” y “La Niña” afectando la cantidad y frecuencia de las lluvias, esto a su vez, la reducción drástica de los caudales disponibles para riego. El balance hídrico ha permitido disminuir el número de riegos por año en un valor promedio de tres riegos, lo cual representa un ahorro de agua de 4,000 a 5,000 m³/ha por año. Cruz, R. (2013), uso del balance hídrico para la gestión sostenible del agua.

- **Venezuela**

En la zona semiárida del estado de Lara, Venezuela, la programación del riego se realiza mediante la aplicación del balance hídrico en el suelo, para el cual, se utilizó la metodología propuesta en la publicación FAO-56 para determinar la evapotranspiración de la caña de azúcar y el balance diario de la humedad en el suelo. Los resultados indicaron que la operación actual del sistema de riego bajo la modalidad de frecuencia y lámina de riego fijas, genera pérdidas excesivas de agua por percolación profunda en las primeras etapas

de desarrollo del cultivo, así como situaciones de déficit hídrico en las etapas de máxima demanda, lo que traería consigo una reducción del rendimiento de la caña de azúcar. En el estudio se propone manejar el calendario de riego en la zona manteniendo la frecuencia de riego fija, pero aplicando una lámina de riego variable definida según el agotamiento de humedad en la zona de las raíces del cultivo. Trezza, Ricardo, et al, (2008), Venezuela).

- **Ecuador**

En la provincia del Guayas, Ecuador, en un experimento de campo en el ingenio San Carlos, programaron el riego en caña de azúcar, mediante el uso del balance hídrico, para el cual, utilizaron como método para estimar la ETo, el tanque evaporímetro clase “A” y el método de Penman-Monteith de la FAO-56. Los resultados obtenidos indicaron que con el uso del balance hídrico se obtiene diversos intervalos de riego, lámina y tiempos de riego según el tipo de suelo. (Pardo, J. (2008).

En Cincae, (2009) Ecuador, recomienda la aplicación del balance hídrico, cuya precisión de medición del punto crítico para aplicar el riego depende de varios factores que influyen en el consumo de agua del cultivo, siendo los más importantes: suelo, clima y edad de la caña. Los resultados obtenidos en el ingenio San Carlos, sugieren que el número de riegos influye principalmente en la humedad del suelo, de la vaina de la hoja y, en la diferencia entre la temperatura del follaje y la temperatura ambiente. Aunque no se observaron diferencias estadísticas significativas en la producción de caña (TCH) entre los tratamientos, hubo una menor producción donde se aplicaron menos riegos. Por otra parte, los valores de la capacidad de campo de los suelos del ingenio San Carlos, resultaron más altos que los valores de la literatura usados para iniciar la implementación del balance hídrico en el ingenio. La incorporación de los valores de capacidad de campo encontrados en el estudio del balance hídrico, permitió un incremento de 7 mm en la lámina de almacenamiento de agua (LAA) en los tres tipos de suelo evaluados. Estos resultados han permitidos un aumento promedio de tres días en el intervalo de tiempo entre riegos, lo que reduciría entre uno a tres el número de riegos por año, sin causar reducción en la producción de caña. (Cincae, Ecuador carta informativa, 2009)

- **Guatemala**

Castro, O., (2012), propuso el balance hídrico para la zona cañera guatemalteca como una herramienta técnica para ahorrar agua y energía. Además con el uso del balance hídrico se logrará que el agua no sea el factor limitante en cada una de las fases fenológicas de la caña

de azúcar, y evitará que el agua se desperdicie por escurrimiento o percolación o que su exceso sea perjudicial al cultivo. En las condiciones de la zona cañera guatemalteca, se presentan dos situaciones en la operación de sistemas de riego: manejo del riego con frecuencias fijas, en esta condición será útil el balance hídrico para ajustar la frecuencia de riego con base a las características de suelo, evapotranspiración en las etapas fenológicas (macollamiento y elongación) y lluvia en el período de zafra. En la segunda situación, la utilización del balance hídrico con sistemas de riego que pueden operar con frecuencia variable (no fija) como el ejemplo de sistemas mecanizados: pivote central fijo. En este caso, aplicar el balance hídrico para la toma de decisión ¿Cuánto y cuándo regar? Y regar cuando la caña de azúcar necesite agua.

2.9.6. Uso del balance hídrico en sistemas pivotes fijos

- (i) Oswald, J. (2006). South Dakota State University, llevó a cabo simulaciones para determinar la eficacia de un paquete de software con balance hídrico que automatiza completamente los sistemas de riego de pivote central en los campos sembrados con maíz, soja y las patatas en los años 1986-2005. Un total de siete sitios de la Central y de las llanuras del Norte fueron escogidos para el análisis (Akron, CO, Ames, IA, Brookings, Dakota del Sur, Oakes, Dakota del Norte, Ord, NE, Puerto Rock, MO, y San Juan, KS). Se utilizaron diferentes capacidades de bombeo en el sistema de 37,9, 50,5 y 63,1 litros / segundo se simuló en sitios con diferentes capacidades de retención de agua útil en el suelo de 83, 125, y 167 mm / metro. Los resultados indican que el software fue capaz de programar los riegos de manera efectiva, con el uso de la ecuación de Penman Monteith que estimó la evapotranspiración de referencia (ET_o) a lo largo de la temporada de cultivo para todo tipo de cultivos simulados. Para el maíz, se reportó evapotranspiración (ET_c), que dio como resultado un contenido mínimo permisible de agua del suelo por temporada.
- (ii) Qassim A et al. (2008), utilizó el balance hídrico para ahorrar agua y/o aumentar la productividad en la industria láctea de regadío en Australia que depende de pastos como fuente de bajo costo de forraje para la producción de leche. La industria se encuentra bajo una creciente presión para utilizar los recursos limitados de agua de manera más eficiente. Los resultados indican que en la temporada 2004/2005 y 2005/2006 en la granja lechera comercial en la Región de riego en el norte de Shepparton Victoria la producción de pasto acumulado de materia seca (MS) fue de 15,5 y 11,3 toneladas MS ha⁻¹ para las dos estaciones de riego respectivamente, con una eficiencia del uso del agua agronómica (EUA), de 16 y 12 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente. Estos resultados indicaron que la programación

- del riego con balance hídrico impidió el estrés hídrico y dio como resultado una alta eficiencia de riego.
- (iii) Rogers, Danny, et al (2003). De la Universidad del estado de Kansas, EEUU, recomienda utilizar la *evapotranspiración* para la programación del riego con pivote central, el cual es un componente base para la determinar el balance hídrico en el suelo. La programación del riego con balance hídrico, permite a los administradores determinar cuándo comenzar un riego, la aplicación y el tamaño o cantidad de esa aplicación. La red de resultados de la programación adecuada incluye un uso eficiente y prolongado de los limitados recursos hídricos y la mejora el crecimiento y desarrollo del cultivo, mejorando así el rendimiento y la reducción de los costes de bombeo.
 - (iv) Andales, A, et al. (2011) del área de extensión de riegos de la Universidad de Colorado, resaltan la importancia de la aplicación del balance hídrico para la programación del riego con pivote central, indican que el riego no pierde de vista el déficit hídrico del suelo al tener en cuenta todas las adiciones y sustracciones de agua de la zona radicular del suelo. Así mismo, el consumo de agua del cultivo o evapotranspiración representa el más grande de la sustracción de agua de la zona de las raíces mientras que la precipitación e irrigación proporcionan las principales adiciones. Que la evapotranspiración del cultivo se puede obtener de la red meteorológica Agrícola Colorado (CoAgMet) o mediante el uso de atmómetros. Entre otros, el suelo en la zona de las raíces tiene una parte superior, así como un límite inferior de almacenamiento de agua que puede ser utilizado por los cultivos, a medida que el cultivo crece y extrae el agua del suelo para satisfacer su requisito ETc, el agua almacenada en el suelo se agota gradualmente y los atmómetros están diseñados para simular el uso del agua de un cultivo de referencia bien regado.
 - (v) En Nebraska, Sridhar, V. (2010). Utilizó el balance hídrico en suelos arenosos de duna, utilizando el modelo de Thornthwaite-Mather, el cual estimó los excesos y déficit durante el año.

2.9.7. Software's existentes adaptables para caña de azúcar para la planificación, ejecución y evaluación del riego

- (i) **Watershed2 (2009)**, es un software desarrollado por el gobierno de Australia, constituye una herramienta de gestión de riego, en línea libre, fue diseñado principalmente para su uso con cultivos de campo, pero también se puede utilizar en

caña de azúcar. Utiliza datos meteorológicos en tiempo real para calcular el crecimiento del cultivo y el uso del agua. Se requiere un nombre de usuario y contraseña. El software fue diseñado para optimizar el uso del agua en Australia, debido a la disminución de los recursos hídricos y el aumento de las necesidades de alimentos, por lo que se requiere una mayor eficiencia en el uso del agua, tanto en secano como en la agricultura de riego. Utiliza el modelo de la FAO y Cropwat para la programación del riego.

- (ii) **CropWat (1986)** es un Software diseñado por la FAO para diferentes cultivos, pero se puede utilizar en caña de azúcar. Fue desarrollado para predecir adecuadamente los efectos de la escasez de agua, el cual, requiere calibración de los principales parámetros de cultivo. Para su calibración se elaboraron procedimientos basados en los diferentes parámetros de cultivo, producto de los resultados de las investigaciones de los tratamientos. El estudio demostró que el modelo que utiliza CropWates útil para la mejora de los diseños experimentales en estudios de investigación y en la identificación de inconsistencias en los procedimientos y resultados. Además, el modelo permite un sistemático análisis de los resultados, una presentación más uniforme de los datos, y una mayor compatibilidad de los resultados. El uso del Cropwat model se puede encontrar en FAO (2002).
- (iii) En Southern Africa en 1995, se utiliza CanePro en respuesta a una petición de los agricultores de caña de azúcar para una herramienta de gestión agrícola. Por lo tanto, desde el principio, **CanePro** fue desarrollado en asociación con la industria del azúcar destinado a satisfacer las necesidades específicas de las operaciones de cultivo de caña de azúcar.

Cane managment software, CanePro. (2016) utiliza un enfoque de balance de agua simulada para la programación del riego. Un balance hídrico del suelo de varias capas se combina con una versión específica de caña de azúcar, así validada de la ecuación de Penman- Monteith. El desarrollo del cultivo se calcula utilizando un modelo de desarrollo del dosel por tiempo térmica, y la retroalimentación estrés hídrico tanto en el desarrollo de los cultivos y la fotosíntesis se trata en el modelo. El contenido de agua del suelo simulado se puede ajustar manualmente en respuesta a la inspección o medidas de campo directo del agua del suelo, anulando efectivamente el equilibrio modelado.

Los campos que están vinculados a los indicadores definidos por el usuario lluvia, estaciones meteorológicas y los tipos de sistemas de riego, que se utilizan para definir restricciones de suministro de agua. Los datos reales (eventos de riego y de lluvia) son capturados a través de interfaz de calendario fácil de usar de CanePro. Una extensa interfaz gráfica permite al usuario analizar el equilibrio de agua y componentes del crecimiento y el desarrollo en detalle. Horarios de riego CanePro eventos futuros, y los requerimientos de agua pueden ser enrolladas a niveles más altos que permiten al usuario generar órdenes de agua a nivel raíces.

Numerosos informes permiten al usuario evaluar la gestión de los campos individuales, o unidades de gestión de nivel superior. Herramientas SIG integrados de CanePro permite al usuario ver los niveles de estrés actuales y dar prioridad a los campos en relación con el estado de humedad actual.

- (iv) **En Suazilandia**, MacGlinchey de Swaziland Sugar Association Extension Services, menciona que Thompson en 1977 propuso conceptos del balance de agua en caña de azúcar. Propuso un modelo basado en un equilibrio entre la oferta y la demanda de agua dentro de las limitaciones de un depósito, el tamaño de que fue determinado por las propiedades del suelo. Los componentes de este balance de agua se estimaron a partir de medidas simples y cálculos. La evaporación se estimó a través de un tanque clase A. El suministro de agua se estimó a partir precipitación efectiva (Se supuso que el 70% de la precipitación total), la lámina neta de riego y la capacidad de almacenamiento disponible del depósito en el momento de precipitación. Estos conceptos se incluyeron posteriormente en un programa informático desarrollado por Thompson y Harding (1986) en el que se mantuvo un equilibrio de agua al día, lo que permitió comparaciones entre las estrategias de riego.

Los avances en la modelización de los procesos de suministro de agua y la demanda han llevado al desarrollo de un detallado modelo de simulación, **Canegro (2008)**, capaz de estimar los componentes del balance de agua con mayor precisión (1 de noviembre, 1991; Inman- Bamber et al., 1993; McGlinchey et al., 1995; McGlinchey e Inman-Bamber, 1996a). La demanda de agua se estima utilizando una Penman-Monteith. Para estimar el crecimiento se utiliza el índice de área (LAI) estimada por la superficie del modelo y el suelo las condiciones de humedad.

El "modelo Canegro fue utilizado para simular el riego de cuatro tipos de suelo para el área en el norte de Mhlume Swazilandia.

En Mauricio, Cheeroo-Nayamuth, (2003), validó el módulo Canegro V3.5 DSSAT modelo que fue desarrollado con coeficientes genéticos de variedades NCo376 y N12. Desde la morfología y fenología de las variedades cultivadas en Mauricio son diferentes, el uso de coeficientes disponible en la versión original del modelo de variedad R 570 dio lugar a sobreestimación de los índices de área foliar (IAF), la biomasa aérea, y tallo y sacarosa rendimientos.

Fares, A. (2013) de la Universidad de Hawái, presentó **IWREDSS**, 2.0 dirigido a la estimación de los requerimientos de agua de diferentes cultivos, entre ellos, la Caña de azúcar. El modelo del software estima las necesidades de riego (IRR) de cultivos perennes y cultivos anuales cultivados en suelos de Hawái. Utiliza los componentes del balance hídrico, incluyendo los requerimientos de agua de riego neto (RIN), agua de riego bruto requisitos (GIR), tarea de agua en pulgadas de 1000 galones por acre (GAL_A), la lluvia bruta, (G_RAIN), la lluvia neta (N_RAIN), la lluvia efectiva (RE), la escorrentía (RO), la interceptación del dosel (INT), evapotranspiración potencial (ETO), la evapotranspiración de referencia (ETC), y el drenaje (DR). Los modelos utilizan diversos sistemas de aplicación de riego (sistemas de goteo, goteo por aspersión, aspersión múltiples, entre otros).

Las estaciones de crecimiento, y las prácticas de riego. **IWREDSS** utiliza diferentes bases de datos sobre las condiciones meteorológicas, los parámetros de captación de agua de los cultivos, sistemas de riego, y las propiedades físicas del suelo. Estas bases de datos y otros datos utilizados en **IWREDSS**. Se ejecuta como una Add-In de la ESRI ArcGIS 10.x. Este informe incluye una guía paso a paso sobre cómo **IWREDSS** utilizar para simular TIR para un área específica en función de su clave de mapa de Impuestos (llamado en este TaxID documento), o incluida como una capa SIG. Los resultados se presentan **IWREDSS** en un archivo de texto (ASCII) y gráficamente como una capa SIG / mapa. **IWRDESS** fue calibrado y validado con datos estimados de riego de Hawaii USDA-NRCS Manual 38 (USDA-NRCS, 1996). Estos datos incluyen las necesidades de riego para algunos cultivos en las principales islas de Hawaii. Un análisis de sensibilidad también se llevó a cabo aprobar el efecto de la sincronización de las estaciones de crecimiento en las TIR de semillas de maíz (cuatro el mes en crecimiento II temporada) con doce fechas de inicio diferentes a lo largo del año (enero a diciembre).IRR estimaciones también se calcularon para diferentes cultivos bioenergéticas en virtud de las condiciones de viento en las islas de Maui, Kauai, Oahu y Hawaii. Calculan las necesidades de riego con **IWREDSS** para diferentes cultivos específico para islas de Hawái basados con los estimados por el USDA- NRCS Manual 38. Las pequeñas diferencias relativas entre los dos conjuntos de datos podrían ser debido a varios factores incluyendo espacial y temporal, la

variabilidad de las precipitaciones, evapotranspiración, y las propiedades físicas del suelo, y los métodos de interpolación utilizada para estimar la precipitación y la evapotranspiración.





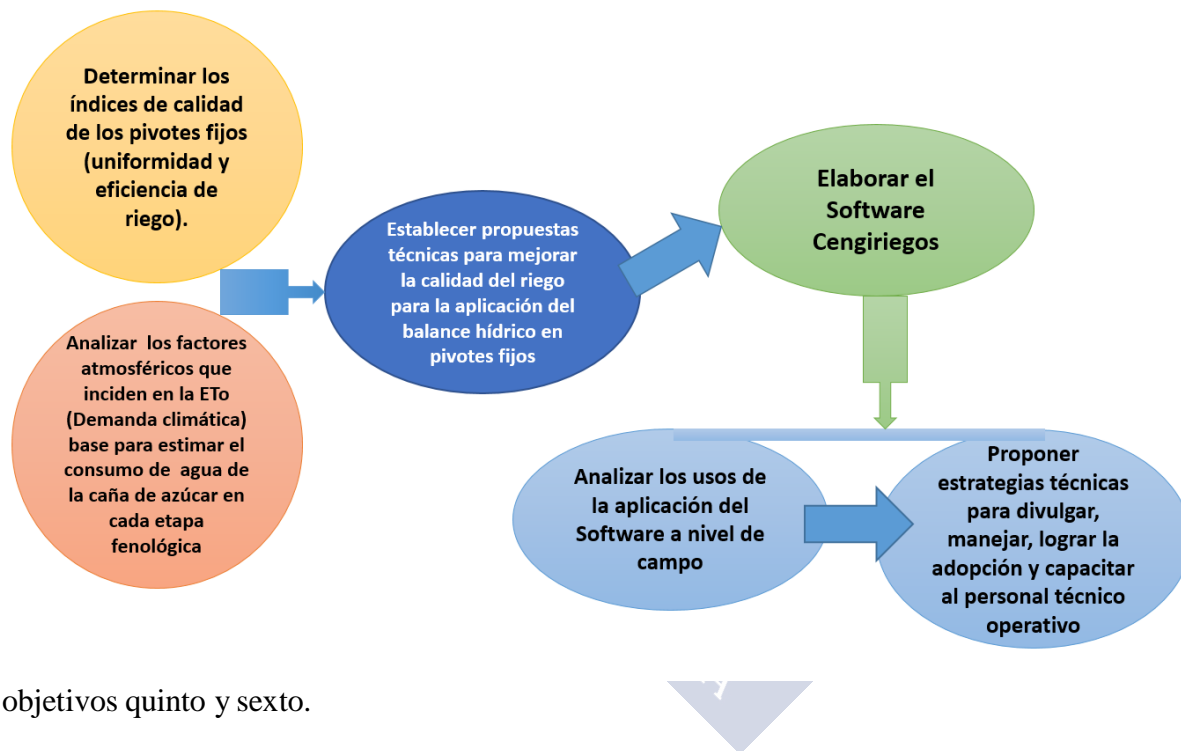


III. MATERIALES Y METODOS

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 ESQUEMA GENERAL DE TRABAJO

Para cumplir con cada uno de los objetivos propuestos, se estableció un esquema de trabajo secuencial para llegar a aplicar el balance hídrico en el suelo utilizando el sistema de riego “pivote fijo”, de forma específica para la zona cañera guatemalteca. En la Figura 3.1 se observa el esquema de trabajo, el cual permitió llevar una secuencia, de manera que el cumplimiento de los dos primeros objetivos, fueron la base para cumplir con el tercero, este a su vez, fue la base para la elaboración del software **Cengirriegos** (cuarto objetivo) y luego el cumplimiento de los



objetivos quinto y sexto.

Figura 3.1. Esquema secuencial de cumplimiento de los objetivos para llegar a la aplicación del balance hídrico en el suelo con sistemas de riego "Pivote fijo", caso de la zona cañera guatemalteca.

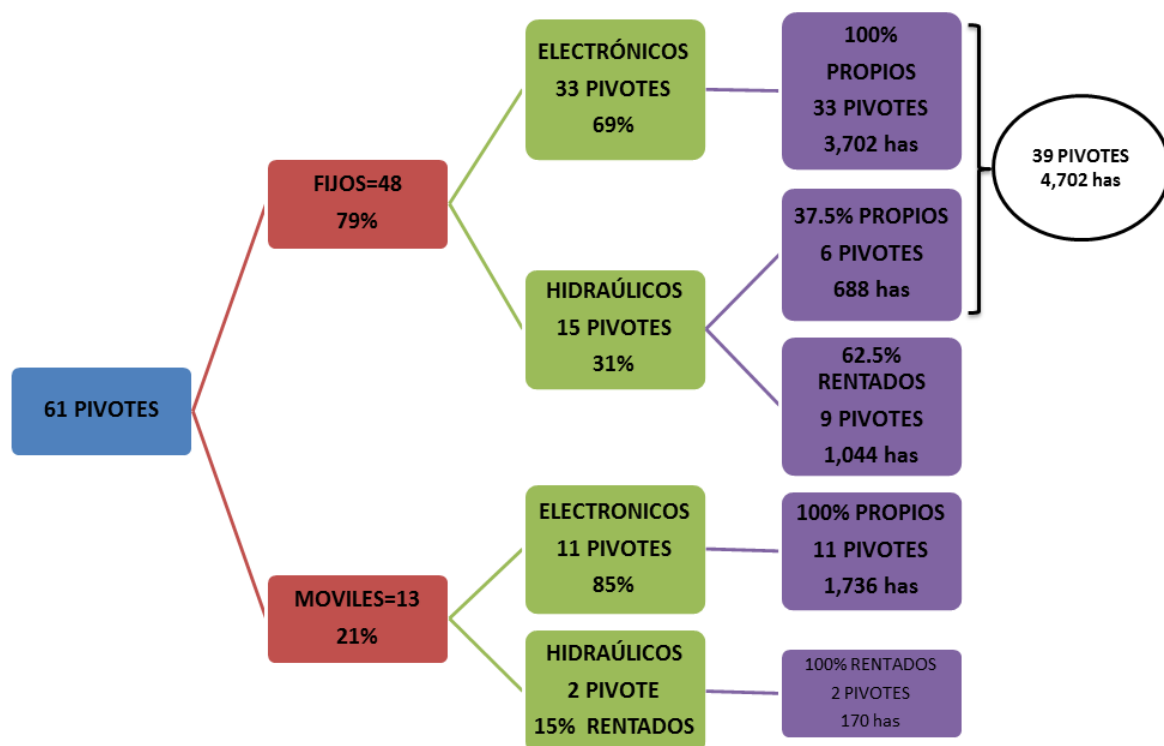
La base técnica y la metodología de cumplimiento de cada uno de los objetivos es la siguiente:

3.2. CALCULO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD (UNIFORMIDAD Y EFICIENCIA) EN LOS SISTEMAS DE RIEGO “PIVOTE FIJO”

Para determinar los índices de calidad del riego se realizaron ensayos de campo con el fin de determinar la uniformidad y eficiencia con que operan los sistemas “pivotes fijos”. Los ensayos de

campo se realizaron en tiempos normales de trabajo, aprovechando los primeros estados de desarrollo del cultivo de la caña de azúcar (iniciación ó macollamiento) y se utilizó las calles de acceso entre lotes lo más posible.

Castro L. O. (2015) definió un total 39 pivotes fijos que operan en 4,702 ha en áreas administradas por los ingenios (Figura 3.2) y que constituyeron el objeto de estudio, del cual se obtuvo una muestra de 8 pivotes (20.5 %). Los pivotes fijos fueron seleccionados basados en el interés que mostraron los ingenios Madre Tierra, Pantaleón y Magdalena. De esta manera en el período de zafra 2,014/2,015 se realizaron 12 evaluaciones de campo.



Fuente: caracterización de sistemas pivote, área de riegos, CENGICAÑA, 2015

Figura 3.2. Caracterización de los pivotes ubicados en la zona cañera guatemalteca zafra 2014-2015. Castro L. O. (2015)

En la Figura 3.3 se muestra la ubicación de donde se realizaron los ensayos de uniformidad y eficiencia, el cual abarcó diferentes estratos altitudinales.

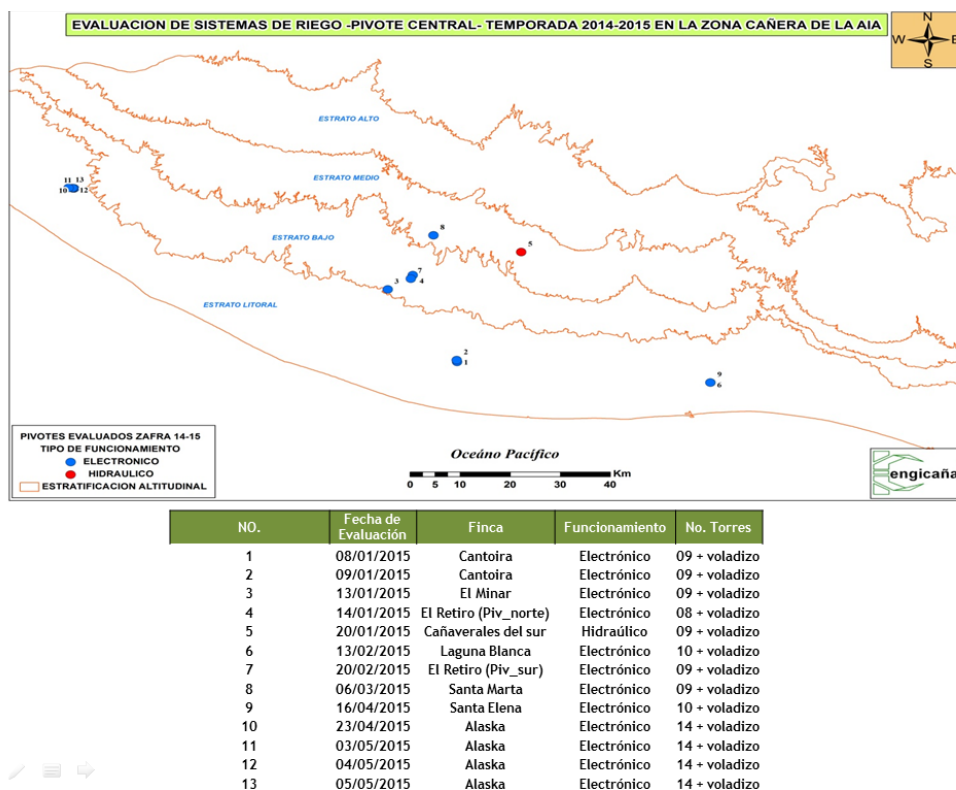


Figura 3.3. Ubicación de la zona cañera guatemalteca de donde se realizaron los ensayos de uniformidad y eficiencia.

Para medir la uniformidad y eficiencia con que operan los sistemas se utilizó la metodología recomendada y descritas por Keller y Meriam (1978), Keller y Bliesner (1990), Pereira y Trout (1997), AsAE (1998), ISO-11545 (2001), los cuales son descritos y mencionados por Tarjuelo (1999) y Valin (2006).

Para la realización de la evaluación de los sistemas pivote se utilizó la metodología descrita por Valin (2006), la cual fue la siguiente:

- Datos generales: propietario; localización; cultivo y fecha;
- Caudal total de entrada al sistema;
- Longitud de los tramos que forman el sistema;
- Radio efectivamente regado por el sistema. Cuando el sistema está equipado con un cañón en la extremidad, el radio regado es superior a la longitud física del ramal;
- Anchura mojada en el extremo y tiempo de aplicación de agua en un punto de esa zona;
- Velocidad de desplazamiento de la última torre;
- Presión de funcionamiento y caudal descargado en varios puntos a lo largo del ramal;
- Diferencias de cota entre el centro del sistema y el punto más alto y más bajo de la parcela;
- Alturas de agua recogidas en dos líneas radiales de pluviómetros; El material utilizado en las evaluaciones fue el siguiente:
- Formulario para la adecuada recogida de los datos de campo (Anexo I);

- Cronómetros;
 - 100 a 150 pluviómetros, de 23 cm de diámetro y una altura de 25 cm dependiendo de la dimensión del ramal, y los respectivos soportes metálicos. Los pluviómetros presentan forma cilíndrica, con un diámetro de 15 cm;
 - Cintas métricas para la medición de la distancia entre los pluviómetros, el radio mojado, la longitud de los tramos y el cálculo de la velocidad del sistema;
 - Probetas graduadas para la medición de los volúmenes recogidos;
 - Anemómetro de la estación más cercana;
 - Catálogos de los sistemas evaluados, donde se recogen los emisores instalados, la presión y el caudal teórico, y las instrucciones necesarias para la regulación de la máquina. Esta información permitirá comparar el funcionamiento real del sistema con aquel que era esperado. Los ensayos se realizaron en las condiciones normales de trabajo, aprovechando los primeros estados de desarrollo del cultivo, para éste no interceptar la recogida de agua en los pluviómetros. Los pasos seguidos en la evaluación se describen a continuación.
- Colocación de los pluviómetros, a lo largo de dos radios, empezando en el centro del sistema pivote, con una separación de diez metros. El primer pluviómetro se colocó a una distancia de 40 m del centro del sistema.

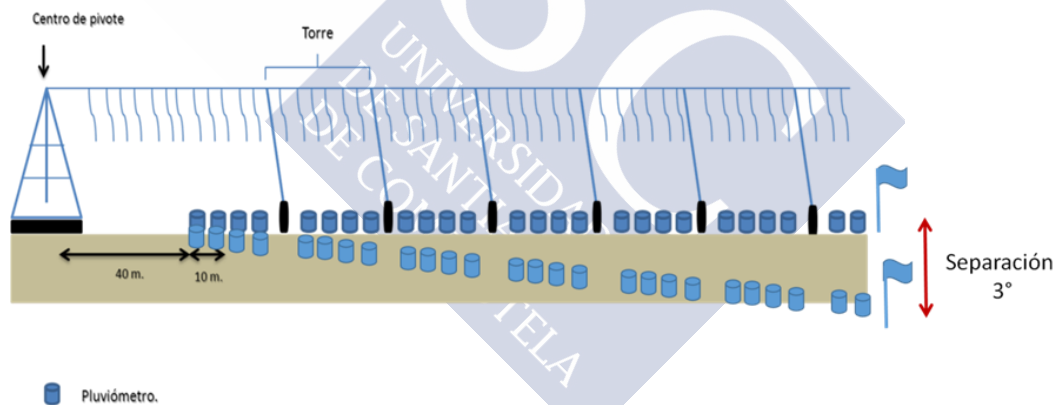


Figura 3.4. Colocación de los pluviómetros a lo largo del radio del pivote fijo.

- Enumeración de los pluviómetros, indicando su posición relativa a lo largo del radio en relación al centro. En sistema de grandes dimensiones, los primeros pluviómetros pueden ser eliminados, aproximadamente un 20% de la longitud, manteniéndose el número de sus posiciones. En la extremidad de los dos radios de pluviómetros, la cuerda entre ellos no debe superior a 50 m. En la Figura 3.4 se observa la forma de colocación de los dos radios de pluviómetros durante el ensayo, para el cual se utilizó las calles entre lotes como se muestra en la Figura 3.5. Las mediciones durante el riego fueron: presión al inicio y final del sistema para el cual se utilizó un manómetro con “Tubo de Pitot”, revoluciones del motor/min, caudal de entrada al equipo, velocidad del viento y dirección del viento de la estación meteorológica

cercana cada 15 min., tiempo de riego, velocidad desplazamiento del sistema (medición de la velocidad media desplazamiento en la última torre).



Figura 3.5. Colocación de pluviómetros en las calles donde se dividen los lotes.

Para el análisis de la Uniformidad del riego se utilizó el programa DEPIVOT presentado en la Universidad de Compostela por Valín M.I (2006). El programa fue desarrollado en Visual Basic 6.0 incluyendo una base de datos en Access 2003. El módulo utilizado fue “evaluación de sistemas ya en funcionamiento”, para el cual, se calculó los indicadores de Uniformidad de Distribución (UD) y Coeficiente de Uniformidad (CU).

Basado en la información que solicita DEPIVOT, en la Figura 3.6. se observa las entradas y salidas del programa en el módulo de evaluaciones de sistemas ya en funcionamiento.

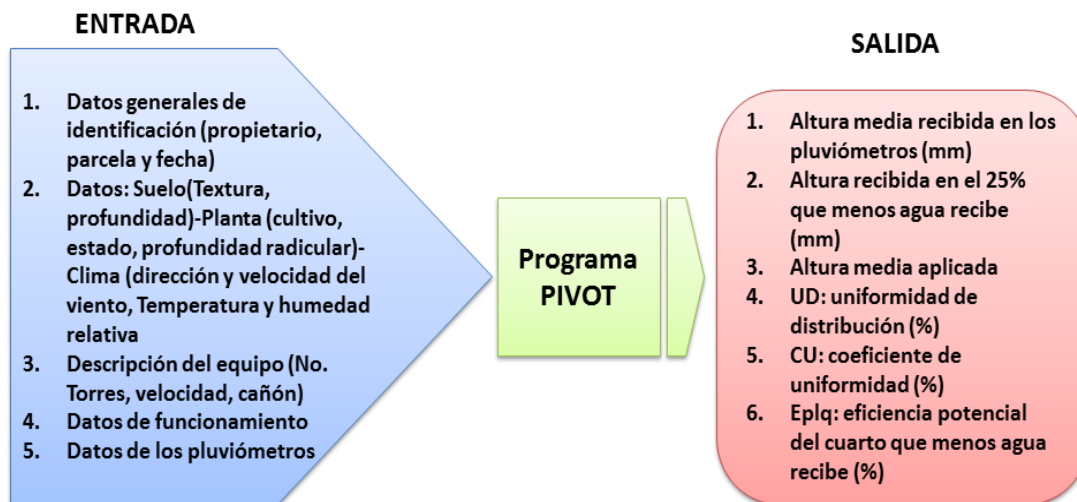


Figura 3.6. Entradas y salidas del programa DEPIVOT en el módulo de evaluación de sistemas ya en funcionamiento. Valín M. I. (2006)

En la Fig. 3.7 se presenta la ventana para la introducción de la información referente a los

pluviómetros y a las alturas de agua recogidas durante la evaluación de campo. Con base a esta información se presenta el gráfico alturas de agua a lo largo del radio del sistema y los indicadores radio 1 e indicadores radio 2. En los dos radios de pluviómetros se introduce el número de posiciones totales, N° de posiciones, y el número de orden de la primera en la que se coloca un pluviómetro, posición 1° pluviómetro, seguidamente se introducen los volúmenes de agua recogidos en cada pluviómetro. Presionando el botón alturas de agua se convierten los ml recogidos en el campo en alturas de agua (mm). Presionando el botón gráfico se representan las alturas de agua a lo largo de los dos radios y el botón indicadores, muestra los indicadores de la calidad del riego.

*MODELO PARA EL DISEÑO Y
EVALUACIÓN DE SISTEMAS PIVOTE*

*DEPIVOT: MODELO PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN
DE SISTEMAS PIVOTE DE RIEGO POR ASPERSIÓN*

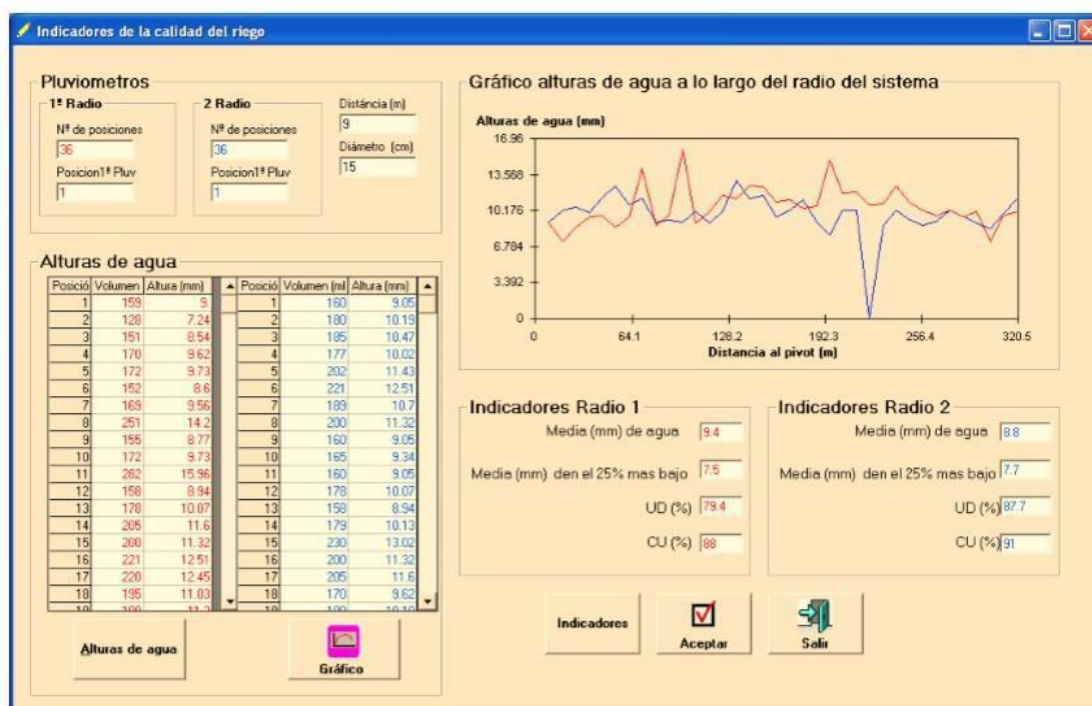


Figura 3.7 Ventana para la introducción de los datos referentes a los pluviómetros en la evaluación de sistemas en funcionamiento (Valín M.I, 2006).

En el caso del análisis de la eficiencia del riego en sistemas “pivotes fijos” se utilizó la metodología indicada por Tarjuelo J.M. (1999), el cual utiliza la curva de distribución de frecuencias acumulativas, tal como se observa en la Figura 3.8.

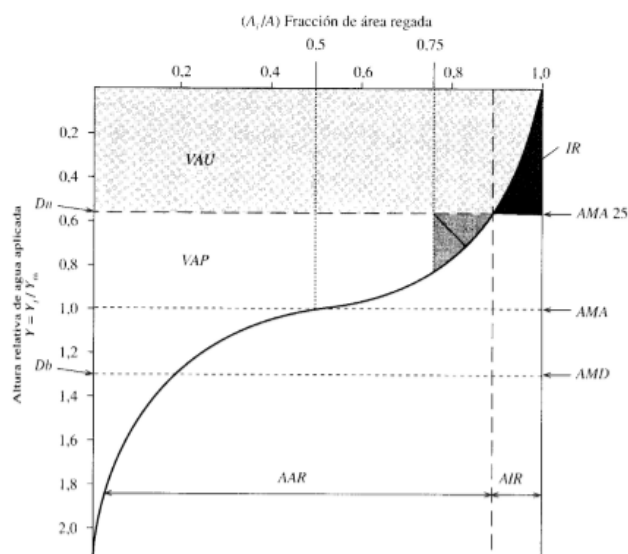


FIGURA 6.3. Curva de distribución de frecuencias adimensional.

siendo:

- Dn = altura relativa de agua equivalente a la dosis neta;
- AAR = área adecuadamente (o sobre) regada;
- AIR = área infraregada;
- $AMA\ 25$ = altura media de agua aplicada en el 25 % del área menos regada (coincidirá con la altura de agua desecada o Dn);
- AMA = altura media de agua aplicada al terreno;
- AMD = altura media descargada (coincidirá con la dosis bruta Db);
- VAU = volumen de agua utilizada por el cultivo;
- VAP = volumen de agua percolada;
- IR = volumen de déficit.

Figura 3.8. Curva de distribución de frecuencias adimensional, Tarjuelo J.M., (1999).

3.3. EL ANÁLISIS DE LOS FACTORES ATMOSFÉRICOS QUE AFECTAN EL REQUERIMIENTO DE AGUA EN LA LATITUD 14°N 90° O

Para determinar los factores atmosféricos que afectan el requerimiento de agua en la zona cañera guatemalteca se ubica en la latitud 14° Norte y longitud 90° Oeste, se utilizó Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ETo con el método FAO Penman-Monteith (Ver Figura 3.9) y fue recomendado por expertos e investigadores en riego en el evento organizado por la FAO en mayo de 1,990, FAO. (2006), Indicada en series riego y drenaje #56, la definición de ETo es la siguiente “Evapotranspiración de referencia basado en un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado”.

El método reduce las imprecisiones del método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos. En

este caso, únicos factores que afectan la ETo son los parámetros climáticos. Por lo tanto, la ETo es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. La ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo.

La utilización del método ETo Penman-Monteith para las condiciones de la latitud 14° N y longitud 90° O, representó tener la oportunidad de estudiar los requerimientos de agua de la caña de azúcar basado en la demanda climática, analizar el comportamiento de la energía que llega al límite de la atmósfera en el tiempo y espacio. Así como estudiar el fenómeno ENSO y sus efectos en la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre, también, sus efectos en el comportamiento de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, especialmente. Entre otros, se seleccionó el valor del requerimiento de agua técnicamente viable con fines de diseño y planificación del riego tomando como base los valores de Kc según etapa fenológica de la caña de azúcar y de esta manera, establecer recomendaciones técnicas que contribuyan a la optimización del uso del agua, basado en el comportamiento del requerimiento de agua.

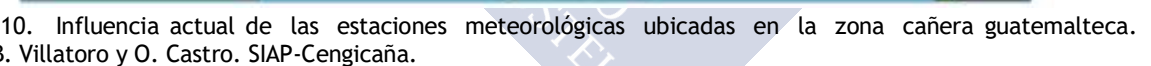
$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

donde:

ET _o	evapotranspiración de referencia (mm día ⁻¹)
R _n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
R _s	radiación extraterrestre (mm día ⁻¹)
G	flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u ₂	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e _s	presión de vapor de saturación (kPa)
e _a	presión real de vapor (kPa)
e _s - e _a	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

Figura 3.9. Modelo de definición de la demanda climática a través de la estimación de la ETo por Penman Monteith. Serie riego y drenaje 56, FAO (2006).

Para la estimación de la ETo se utilizó información histórica de las 16 estaciones meteorológicas que administra el Instituto de Cambio Climático, ICC, (2015) que están distribuidas en toda la zona cañera guatemalteca, como se observa en la Figura 3.10, las variables analizadas son: radiación global, temperatura, humedad relativa, velocidad del



El SC se elaboró con el lenguaje de programación PHP

La creación y realización del SC se fundamentó por la existencia de una base de datos y resultados de investigación generados en la industria azucarera guatemalteca que precisa de un software más adaptado a sus condiciones que no ofrece el mercado. El resultado del producto de la base de datos podrá ser compartida por todos los usuarios asociados a la agroindustria azucarera con el aval de la Junta Directiva de Cengicaña, así mismo, será muy útil para la

toma de decisiones técnicas en la aplicación del riego en tiempo real. La base de datos está constituida por la información siguiente:

1. Base de datos de productividad (privada, específica y propia del gremio azucarero asociado de la zona cañera guatemalteca).

Base que contiene información a nivel de lote referente a la producción de TCH, rendimiento de azúcar, variedades, etc. Para el caso particular de la implementación del software, solo será necesario para la ubicación espacial de los lotes (tiene en promedio un tamaño de 15 ha). Esta base solo se había estado utilizando para fines de análisis productivo de azúcar por lote, cuyos resultados se manejan con mucha confidencialidad. La georeferenciación permite ubicar un lote, en una zona o región, en una finca, y a una estación meteorológica más cercana dado a su área de influencia.

2. La red de estaciones meteorológicas automatizadas

La red es propiedad de la industria azucarera guatemalteca y es administrada por el Instituto guatemalteco de cambio climático (ICC) ubicado en Cengicaña. La red inició con dos estaciones meteorológicas en el año 1998, ya en el 2016, el número se incrementó a 22 estaciones meteorológicas ubicadas estratégicamente en las 200,000 ha de toda la zona cañera. La red opera de forma automatizada y transmite la información a través del servicio de comunicación General Packet Radio Service (GPRS) que es administrada en el área técnica del ICC ubicada en las instalaciones de Cengicaña. Genera información meteorológica cada 15 minutos de las variables meteorológicas: lluvia, radiación global, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. En la Figura 3.10 se indica la ubicación de cada estación y su área de influencia actual. La información de cada una de las estaciones meteorológicas está a disposición de investigadores, académicos, estudiantes y población en general de manera gratuita a través del sitio <http://redmet.icc.org.gt/>

3. La red de pluviómetros administrados por los ingenios

A parte de la red de estaciones meteorológicas automatizadas, existe una red de pluviómetros que es administrada por los encargados de fincas que administran los ingenios. La medición se realiza de forma manual. El número de pluviómetros en cada una finca puede ser mayor a uno dado al comportamiento de la lluvia, normalmente se ubican en el casco o área administrativa de cada finca. La mayoría de pluviómetros han sido fabricados con los parámetros técnicos recomendados por la Organización meteorológica mundial (OMM). La medición de la lluvia con el pluviómetro más cercano al lote será de suma importancia para el éxito en la aplicación del balance hídrico, dado a que la lluvia es una variable meteorológica muy heterogénea en el tiempo y espacio.

4. La base de datos de parámetros de riego según clasificación y textura de suelos

Determinada en el laboratorio de suelos de Cengicaña, la base de datos está constituida con información sobre capacidades de los suelos de retener humedad, transformado en lámina de agua aprovechable (LAA), Estos valores han sido generados en el área de riegos derivados de más de 3,000 muestras de suelo que han sido llevados al laboratorio de una variedad de texturas de toda la zona cañera. (Cengicaña, 2012). Tal como se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Capacidad de los suelos de retener humedad según texturas. Zona cañera guatemalteca. Fuente: Laboratorio de suelos de Cengicaña, 2012.

Textura	Capacidad de almacenamiento (mm/cm de profundidad)		
	Máximo	Promedio	Mínimo
Franco limoso	2.53	1.86	1.26
Franco arcillo limoso	1.90	1.85	1.5
Franco	2.04	1.75	1.30
Franco arenoso	2.27	1.63	1.08
Franco arcilloso	1.94	1.61	1.50
Arcilloso	1.74	1.51	1.27
Arena franca	2.03	1.30	0.72
arena	1.27	0.71	0.39

5. Los resultados de investigación experimental sobre de la respuesta de la caña a la aplicación del agua.

Base de datos derivada en el área de riegos de Cengicaña, producto de la investigación experimental que se ha realizado desde 1994, la información existente es sobre los factores de respuesta de la caña a la aplicación del agua, denominado Kc en diferentes tipos de textura (Cengicaña, 2012).

3.4.2. Módulos del SC

Cengirriegos estará compuesto por dos módulos: Riegos y Agrometeorología.

3.4.2.1. El modulo Riegos, estará compuesto por tres submódulos:

1. **El Balance Hídrico en el suelo (BH-CENGI-MT)**, permitirá analizar y estimar el abatimiento de la humedad en el suelo en tiempo real al riego planificado por el técnico, con base al comportamiento de la ETo y lluvia (variables determinantes). Con esta base se sugiere un plan de riego en cuanto a: frecuencia, tiempo y lámina según el estrato

altitudinal, época de corte, tipo de suelo, etapa fenológica y operación del sistema de riego, en este caso del pivote fijo.

2. El comportamiento y seguimiento de la Radiación Global en cada etapa fenológica, fecha de corte y estrato altitudinal, el cual será base para realizar el balance energético y que tendrá como fin, el análisis y la estimación de producción de caña de azúcar.

3. El Comportamiento y seguimiento de la demanda climática (ET_o), tendrá como fin la estimación del consumo de agua según estrato altitudinal y longitudinal, fecha de corte, etapa fenológica.

3.4.2.2. El módulo Agrometeorología

Este módulo permitirá el análisis agrometeorológico por lote, con este submódulo se podrá visualizar el comportamiento de las variables meteorológicas por etapa fenológica: lluvia, radiación global, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

3.4.3. La metodología del balance hídrico a utilizar

El modelo de balance hídrico que se utilizó para la elaboración del software es el descrito en el punto de 2.9.4. de la revisión bibliográfica, que ha sido utilizado con éxito en la zona cañera colombiana.

La metodología del balance hídrico para caña de azúcar adaptada para Guatemala fue liberada por Cengicaña (2,005), descrita en la memoria de presentación de resultados de investigación de la zafra 2004/2005, como una herramienta importante para la planificación y optimización del uso de agua en pivotes fijos para la Finca Monte Alegre del ingenio la Unión. siete años después de su liberación, surgió la necesidad de utilizar nuevamente la herramienta del balance hídrico como una alternativa técnica para estudiar y justificar la merma en la producción de la zafra 2,012/2,013, en forma específica del ingenio Madre Tierra, en ese entonces, se solicitó el apoyo al área de riegos de Cengicaña, para realizar un diagnóstico retrospectivo de los períodos de déficit hídrico del estrato litoral central (de 0 a 40 msnm) en cada una de las etapas fenológicas del ciclo de cultivo 2012, luego de este diagnóstico retrospectivo, nació la idea en el área de riegos de Cengicaña de elaborar una hoja de Excel denominada “Balance Hídrico del suelo”, el cual fue apoyado y validado por técnicos del ingenio Madre Tierra del área de ingeniería agrícola (Ings: Sergio López y Sergio Miranda) y técnicos de la administración Rio Lindo del estrato litoral (Ings: Zimri Alejandro Callejas, Iván Aguirre, Juan Carlos Pineda y Carlos Echeverria), hasta ahora, utilizada como una herramienta para aplicar acciones preventivas, en esta circunstancia, la aplicación del balance hídrico ha permitido diagnosticar el abatimiento de la humedad según el tipo de suelo en

tiempo real y realizar ajustes en la frecuencia, lámina y tiempo de riego a través de parámetros del suelo, caña de azúcar, clima y operación.

Basado en este antecedente, la aplicación del Balance hídrico en el suelo, se denominó BH-CENGI-MT, cuyas siglas significan: Balance Hídrico- Cengicaña-Madre Tierra. El BH-CENGI-MT se fundamenta con variables de la relación: agua-suelo-caña de azúcar-atmósfera-operación del riego., variables que se explican a continuación.

1. Las variables radiación global, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento que serán la base para estimar la demanda climática a través de la ecuación de Penman-Monteith (ET_o), Allen, *et al.*, (2006), FAO (2016), serie de riego y drenaje # 56; Castro L. O, 2013).
2. Los parámetros: capacidad de campo (CC), punto marchitez permanente (PMP) y la densidad aparente, en cada una de las profundidades hasta llegar a 0.60 m, determinaran la capacidad del suelo de retener humedad,
3. El factor K_c que representa la respuesta de la caña de azúcar al agua, resultado de los experimentos realizados en la zona cañera guatemalteca y la demanda hídrica a través de la relación (ET_m) que es igual $ET_m = ET_o * K_c$. (Castro L. O. (2012).
4. El parámetro técnico Déficit permitido de manejo (DPM), que determinará el porcentaje de abatimiento de la humedad en el que debe darse el siguiente riego. que también es conocido en nuestro medio como umbral de riego (UR). Con base a la respuesta de la caña de azúcar al agua, el DPM máximo será la de mantener en el suelo humedad residual de 40 % dentro de CC y PMP (que equivale a un consumo de agua de 60 %).

3.4.4. El SC (Materiales, estrategias y métodos que se utilizaron para la elaboración)

El SC estará diseñado para que no llegue a ser obsoleto, debido a las razones siguientes: el comportamiento del clima es muy dinámico, los resultados que se generen de las investigaciones específicas por sitio o lote pueden reemplazar la información existente y que las respuestas encontradas en cada ciclo generarán nuevas oportunidades de mejora del software para crear nuevos módulos y/o versiones.

3.4.5. Características generales para la aplicación del SC

Las características generales representan los resultados finales de la elaboración del software, se sustentaron en cuanto a: su alcance, requisitos de uso, modelo de operación, efecto multiplicador y los manejos: información técnica para tomar la decisión de regar, administrativo y técnico de SC.

3.4.5.1. Alcance y requisitos del SC en cuanto a su utilización

SC, estará diseñado para ser utilizado en toda la zona cañera guatemalteca. Su capacidad de análisis será a nivel de lote, cuyo código debe de estar georeferenciado y registrado en la base de datos de productividad, por lo que será indispensable que cada ingenio deberá contar con los códigos de lote y será de vital importancia que el lote a tomar en cuenta, esté bajo la influencia de una estación meteorológica que administra el Instituto privado de cambio climático (ICC). El área potencial en el que se puede utilizar el software será de 210,748 ha sembrada de caña de azúcar. El SC se diseñó para mantener la calidad de la información, por lo que solo lo podrán manejar los usuarios que asignen cada uno de los ingenios azucareros asociados de Guatemala. Los usuarios asignados deberán tener una clave de acceso.

3.4.6. Modelo de operación del SC

El SC operará con un modelo integral basado en la relación agua–suelo–caña de azúcar–clima–operación. En la Figura 3.11. se explica paso a paso la forma en que el modelo integral de operación del software funcionará, los pasos enumerados son como sigue.

#1. Se debe de ingresar el código del lote georeferenciado, así como también, la fecha de corte o siembra de la caña de azúcar que será la base para ubicar el lote.

#2. Con el ingreso del código del lote, las variables meteorológicas temperatura ($T^{\circ}\text{C}$), velocidad del viento (VV), radiación global (Rg) y humedad relativa (HR) de la estación meteorológica de influencia del lote, se transmitirá de forma automática a partir de la fecha de corte o siembra indicado, luego, la información meteorológica de las variables indicadas, se irá actualizando y será la base para ir estimando diariamente la ETo (demanda climática) con el modelo Penman-Monteith.

#3. El SC solicitará información sobre las siguientes variables: físicas del suelo, factores de respuesta de la caña de azúcar a la aplicación del agua (Kc) según etapa fenológica del cultivo de la caña de azúcar y operación del sistema de riego a utilizar, estas variables se introducirán sola una vez en el período, salvo, que existan fundamentos técnicos para cambiar las variables. Durante la ejecución se deberá ir actualizado y registrando las variables de entrada (ganancias) como: la lluvia (mm) del pluviómetro más cercano al lote y la lámina aplicada en el riego (mm), así como también, el registro de la humedad en el suelo, cuando el software indique que la humedad en el suelo está cercano al déficit permitido de manejo, registro que será importante realizarlo, especialmente, en las áreas donde se detecte que existe aporte capilar. El registro de la humedad en el suelo será importante para realizar ajustes en el balance hídrico ya sea como ganancia o como pérdida, el cual, será una oportunidad para ahorrar agua y energía.

#4. A través del Modelo FAO 56, descrito en la Figura 3.9, se analizará diariamente a través del registro de las variables temperatura, velocidad del viento, radiación global y humedad relativa. La ETo representará la demanda climática según el estrato longitudinal y latitudinal. La ETo es una variable que será determinante para estimar el consumo de agua de la caña de azúcar según etapa fenológica. Su variación en el tiempo marcará los períodos críticos.

#5. Con base a las variables introducidas del punto uno al cuatro, el modelo generará la estimación del BH-CENGI-MT en el suelo. El BH-CENGI-MT a la vez estimará el abatimiento de la humedad considerando que no existe capilaridad y que no existió escurrimiento y/o percolación. De esta manera, el BH estimará el cambio de humedad en el suelo diariamente, he irá formando la tendencia del abatimiento o incremento diariamente, según las ganancias (lluvia y Riego) o pérdidas (ETm) que se generen en el día.

#6. Se muestra que el modelo también está diseñado para realizar ajustes según la humedad real medida en el campo. En este caso para evaluar la capilaridad como una ganancia, será necesario medirla in situ a nivel de lote con métodos de medición directos o indirectos debidamente calibrados. De la misma manera para evaluar las pérdidas por percolación o escurrimiento.

#7. Indica la importancia de integrar la tecnología de medición de la humedad en el suelo in situ y también el requisito de calibrar los métodos indirectos que se utilice con el método directo gravimétrico o volumétrico (el más exacto). La medición de la humedad en el suelo, generará estimaciones importantes sobre el aporte capilar como ganancia y/o estimaciones sobre las pérdidas se pudieran generar por la aplicación del riego, principalmente, cuando opera con baja eficiencia. En la sección 3.4.8.2. se explicará con más detalle esta acción.

Numerales 2, 8, 9, 10. Se explica el resultado final de la implementación del modelo, en el cual representaran los productos para cada uno de los módulos de riego y agrometeorología, Indicados en el punto 3.4.2 que se refiere al alcance en cuanto a los productos del software.

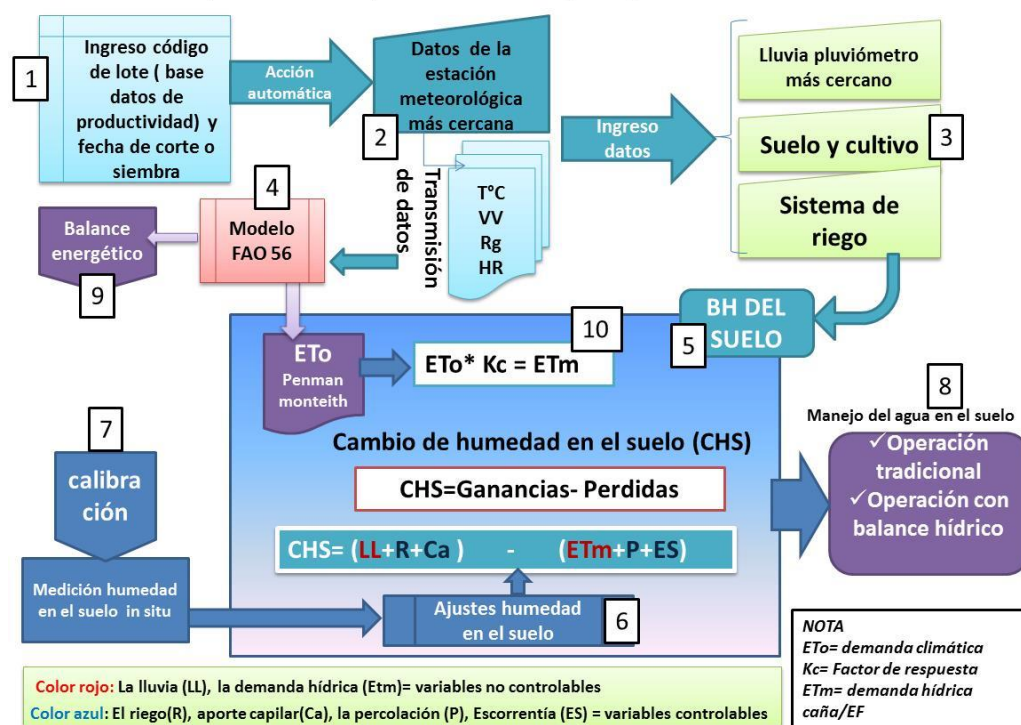


Figura 3.11. Modelo de operación del Software Cengirriegos

3.4.7. Manejo de la información para los usuarios del SC

El usuario del SC tendrá la opción de manejar cinco iconos, los cuales se indican en la Figura 3.12. **El registro** es un icono para el registro de nuevos usuarios o para iniciar nueva sesión. **El inicio**, es un icono de ilustración, en el cual se visualiza de manera estática el modelo de operación del software. **Lotes**, es un icono de registro de información por lote, Agrega: información sobre características del lote e información para el lote en tiempo real. En este icono, también se puede visualizar los avances de resultados o reportes finales del lote sobre: BH-CENGI-MT, ETo y Rg. **Datos**, es un icono, diseñado para importar y exportar información de Excel. En el caso de la importación, esta opción permite ingresar toda la información de la cantidad de lotes que se deseen, para el cual, existe un formato específico para el ingreso de la información. Este icono, también permite la exportación de información a Excel, los cuales, es una opción para manejar la información de resultados a través de tablas dinámicas.

En el caso de los **Reportes**, se diseñó para obtener reportes del estado de lotes/equipo de riego y de lotes por color. Para el caso de los **reportes del Estado de lotes/equipo de riego**, se visualizan cuadros de estado de la humedad del suelo entre CC y PMP y la clasificación según colores es como sigue: optimo (O) azul, muy buena (MB) verde, regular (R) anaranjado y baja (B) rojo. La interpretación indica lo siguiente.

En azul, la humedad en el suelo está en el primer tercio de la humedad entre CC y DPM.

En verde, la humedad está en el segundo tercio de la humedad entre CC y DPM.

En anaranjado, la humedad está en el tercer tercio de la humedad entre CC y DPM, el cual genera en primera instancia la decisión de ir a rectificar la humedad en el suelo in situ, especialmente, en las áreas que tienen aporte capilar o la decisión de regar en el caso de las áreas que no tienen aporte capilar.

En rojo, la humedad está abajo del DPM, significa una zona de riesgo, en el cual la planta puede manifestar déficit hídrico y en consecuencia efectos en la producción de biomasa.

En **Reportes de lotes por color anaranjado**, es el más significativo, los lotes que se clasifican con humedad regular (R), este reporte al bajarlo a Excel, generará diariamente información sobre los lotes que necesitan ir a verificar la humedad en el suelo in situ, para la toma de decisión de regar.

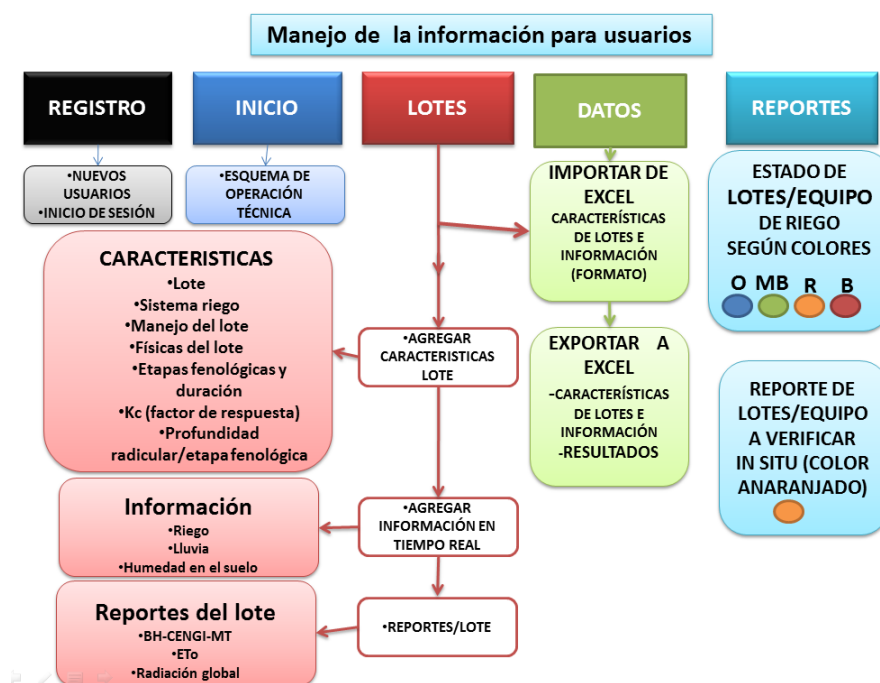


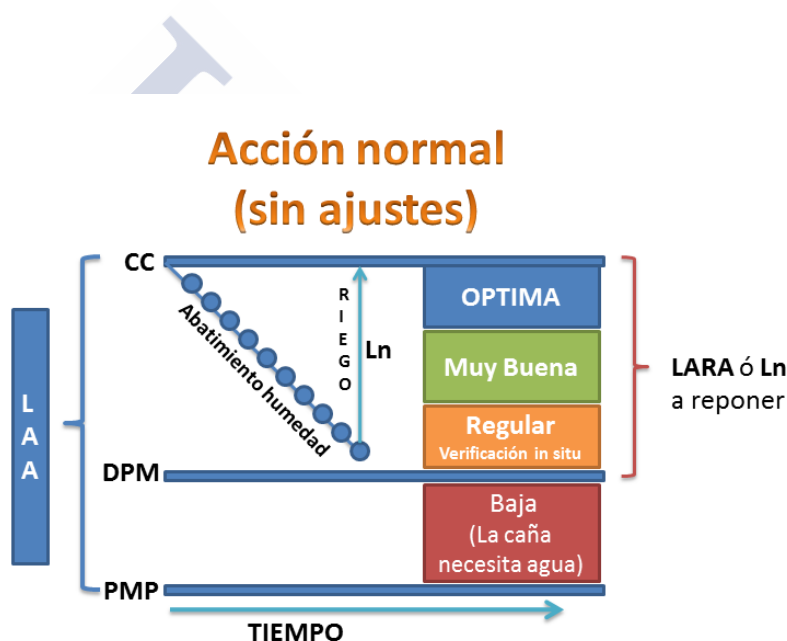
Figura 3.12. Modelo sobre el manejo de la información para usuarios de SC.

3.4.8. Acciones que se deben tomar para la decisión de regar según el abatimiento de la humedad en el suelo

Estas acciones constituyen las opciones que se pueden realizar con la información que se va generando con el SC, las opciones se describen en los puntos: 3.4.8.1 y 3.4.8.2.

3.4.8.1. Cuando en el lote la actividad de riego se realiza normalmente y no existen aportes adicionales en el balance

Esta opción es la que mejor se ajusta a las áreas que no tienen aporte capilar y que el riego se está aplicando con sistemas que operan con eficiencias de uniformidad mayores a 80 %, lo que significa que el riego ha sido bien planificado y no existen pérdidas por escurrimiento y percolación. En este caso, las únicas ganancias se atribuyen a la lluvia y el riego; y la única pérdida es por evapotranspiración. Es una buena opción para suelos con predominio de arcilla y arena, además que se está regando con sistemas de alta eficiencia como los pivotes fijos (ver Figura 3.13).



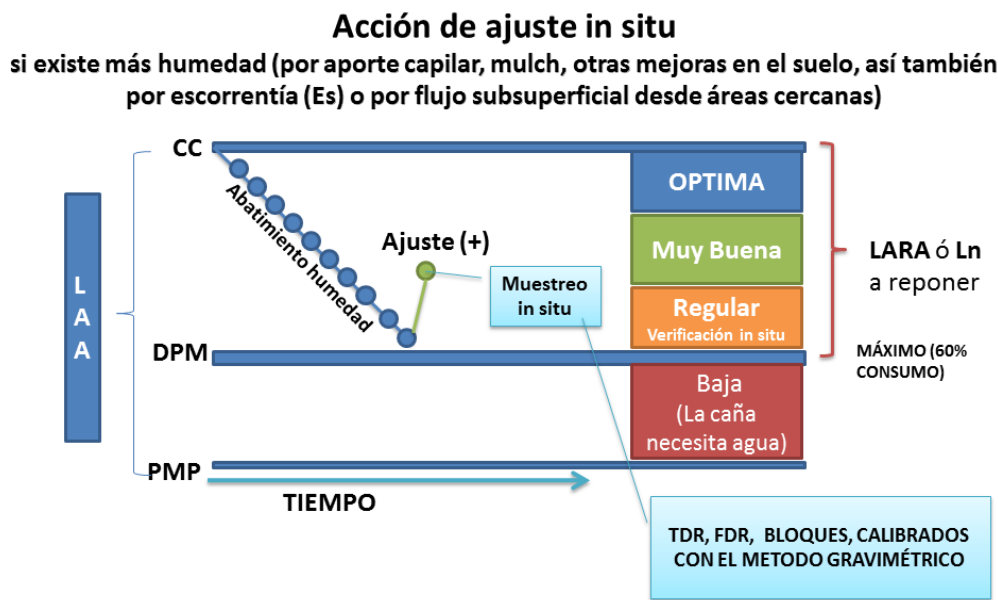
Nota: LAA, lámina de agua aprovechable; CC, capacidad de campo; DPM, déficit permitido de manejo; PMP, punto de marchitez permanente; LARA, lámina de agua rápidamente aprovechable o Lámina neta; Ln.

Figura 3.13. Acción normal sin ajustes en la toma de decisión del riego a través del uso del Balance hídrico.

3.4.8.2. Cuando en el lote la actividad de riego se realiza normalmente y existen aportes adicionales en el balance

Esta opción es la que mejor se ajusta a las áreas que tienen aporte capilar y que el riego se está aplicando con sistemas que operan con eficiencias de uniformidad mayores a 80 %, lo que significa que el riego fue bien planificado y no existen pérdidas por escurrimiento y percolación. En este caso, las únicas ganancias son: lluvia, aporte capilar y riego; y la única pérdida es por Evapotranspiración. Es una buena opción para suelos francos, francos limosos, franco arcillo limosos, que en la realidad se diagnostique aporte capilar, además que se está

regando con sistemas como el Pivote central fijo. En la Figura 3.14 se visualiza la acción de ajuste por medición de humedad en el suelo in situ con técnicas FDR, TDR, Bloques de yeso, calibrados con métodos de medición directos.



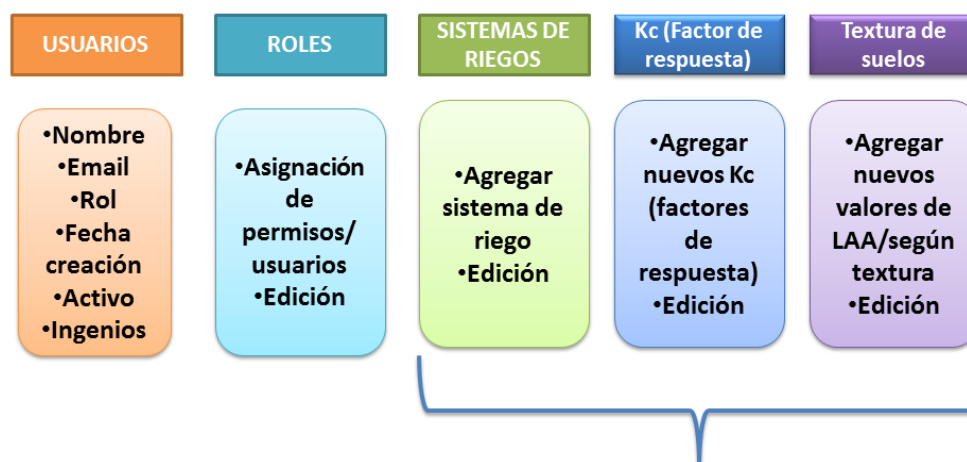
Nota: LAA, lámina de agua aprovechable; CC, capacidad de campo; DPM, déficit permitido de manejo; PMP, punto de marchitez permanente; LARA, lámina de agua rápidamente aprovechable que representa la Lámina neta; Ln.

Figura 3.14. Acción de ajuste por incremento de la humedad en el suelo in situ en la toma de decisión del riego a través del uso del Balance hídrico.

3.4.9. Manejo administrativo general del SC

El manejo administrativo general lo deberá realizar un administrador, el cual tendrá su sede en área de riegos, las acciones del administrador se resumen en la Figura 3.15, el cual estará ligado a las siguientes acciones:

1. Registro de nuevos usuarios, registro de Email, fecha de creación, activación.
2. Asignar permisos a los usuarios según aval del profesional que asigne el ingenio.
3. Manejar la base de datos interna, el cual deberá editar nuevos sistemas de riego, nuevos factores de respuesta y parámetros del suelo.
4. Generar nuevas versiones y/o módulos, si así, se requiere o se solicite.



MANEJO DE LA BASE DE DATOS

Figura 3.15. Manejo administrativo general del SC de la zona cañera guatemalteca

3.5. METODOLOGÍA PARA LA DOCUMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SC

Como se indicó en el apartado 3.4.3. sobre las características generales para la aplicación del SC, se podrán realizar para cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar, fecha de corte y estrato altitudinal, sin embargo, dado a su versatilidad de poder manejar la información a través de Excel, el producto de los módulos, se podría extender y analizar con base a lo que requiere el usuario, en la Figura 3.16, se explica las diferentes aplicaciones más importantes que se pueden derivar del uso del SC.

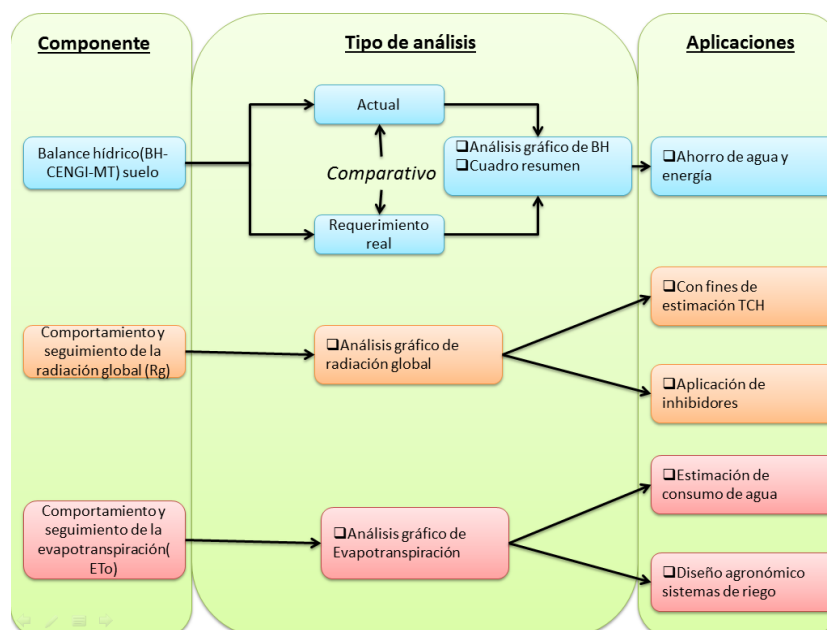


Figura 3.16. Aplicaciones más importantes que se pueden realizar con el SC de los tres módulos disponibles para la zona cañera guatemalteca.

3.5.1. ¿Cómo se documentará y se validará el SC?

SC se empezó a manejar experimentalmente con diferentes técnicos de los ingenios colaboradores a partir de la zafra 2013/2014. Como el SC se inició a través de una hoja de Excel, los técnicos empezaron a manejar el balance hídrico, dándole diferentes usos basados en sus necesidades, de esa manera, se fue documentando y validando. Los principales usos del SC con base a las necesidades técnicas se describen a continuación:

- análisis del déficit de agua en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar de los años en los cuales existió merma en la producción (Análisis retrospectivo) utilizando como herramienta el balance hídrico.
- ajuste de frecuencias, tiempos y láminas en los diferentes sistemas de riego, el cual permitirá planificar adecuadamente el riego.
- manejo de tratamientos a nivel experimental con balance hídrico base para la toma de decisión del riego en áreas con vetas de arena o suelos arenosos.

En estos casos, la generación de información las ha realizado el usuario y la documentación de estos usos se ha concretado con la ayuda del área de riegos de Cengicaña.

El uso de la información enviada a Excel por el SC, también se ha manejado a través de tablas dinámicas.

En el caso del estudio del Impacto del uso del balance hídrico en la economía y sostenibilidad del recurso hídrico se utilizó información del análisis de la zafra y parámetros de eficiencia en el manejo de sistemas de riego y parámetros económicos en cuanto a precios y costos de riego.

3.6. METODOLOGÍA PARA DEFINIR ESTRATEGIAS TÉCNICAS PARA DIVULGAR, MANEJAR, LOGRAR LA ADOPCIÓN Y CAPACITACIÓN DEL SC

La divulgación, manejo, el logro de la adopción y capacitación al personal técnico operativo sobre el SC para la agroindustria azucarera representó un reto muy importante. La utilización del software estuvo determinada por la forma en que se presentó a los usuarios y a las estrategias de manejo que se utilizaron para su análisis e interpretación, dado a la gran cantidad de lotes que el personal técnico operativo de los ingenios asociados tiene que manejar y a la capacitación al personal designado para su uso. Como se indica en el concepto de divulgación “acción y efecto de difundir, promover o publicar algo para ponerlo al alcance del público (<http://definicion.de/>). La divulgación se realizó en toda la zona cañera que cubre más de 200,000 ha, para tal fin, se realizaron presentaciones a diferentes órganos directrices de la industria, a la vez, a los gerentes agrícolas y tomadores de decisión técnica sobre el ¿Cuánto, ¿cuándo y cómo regar?

Dentro del manejo fue muy importante determinar y considerar las estrategias técnicas claves para lograr el objetivo propuesto, referente a que el SC tiene que ser práctico, dinámico y amigable para su implementación en el campo. En el manejo se creó una figura técnica para la administración del software en cada uno de los ingenios asociados a Cengicaña que ayudará a facilitar su uso, seguimiento y retroalimentación para futuras mejoras, así mismo, la asignación de auxiliares dependiendo del número de regiones a cubrir. La creación de la administración y sus auxiliares está facilitando el desarrollo de la capacitación del uso del SC y el efecto multiplicador que se espera.

Para cumplir con el objetivo propuesto de divulgación del SC se realizaron presentaciones a cuatro niveles de decisión técnica de la industria azucarera guatemalteca con el fin de lograr el éxito de este producto en cuanto a su utilización. Los niveles de divulgación son los siguientes:

- a. Junta Directiva (JD) órgano superior de Cengicaña.
- b. Comité Técnico Agrícola (CTA), órgano asesor de Cengicaña.
- c. Comité de Riegos (CR) órgano que integra a todos los especialistas en riegos de los 10 ingenios asociados.

d. Técnicos de los departamentos de ingeniería agrícola de cada ingenio y áreas de investigación agrícola existentes en los ingenios asociados.

Así mismo, se elaboró un artículo para ser presentado en la “Memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2015/16” que realiza Cengicaña todos los años.

3.6.1. El manejo del SC

Las estrategias para manejar el SC, fueron importantes y se elaboró un diagrama que permitió orientar la forma de administrar el SC y determinar toda la secuencia operativa del mismo. El diagrama orientó sobre el manejo técnico de SC y el desarrollo del efecto multiplicador en la zona cañera guatemalteca. Las estrategias para manejar el software fueron avaladas por el comité de riegos.

3.6.2. Adopción y capacitación del personal técnico para usar el SC

Después de presentar y divulgar el SC se establecieron compromisos sobre las áreas de adopción y el establecimiento de un programa permanente de capacitación en cada uno de los ingenios. Como estrategia, la capacitación fue dirigida a los administradores elegidos en cada uno de los ingenios interesados y a los auxiliares seleccionados para tal fin según región o área.



IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ÍNDICES DE CALIDAD DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO PIVOTE FIJOS EN FUNCIONAMIENTO.

La actividad agraria, de modo genérico, pretende suministrar alimentos y fibras, normalmente bajo una actividad económica. El desarrollo de una actividad que compita en un mercado mundial cada vez más globalizado.

La escasez de agua representa un importante condicionante para la actividad agraria. La disponibilidad de agua y la competencia para los distintos usos, justifica que, en el caso de agricultura de regadío, sea necesario optimizar su uso.

Para ello, en lo relativo al riego, es muy recomendable incorporar los avances en tecnología de regadíos, que persiguen la utilización eficiente del agua.

A partir de la información técnica, apoyada con datos de campo, se puede ajustar la elección de sistema de riego y/o, en este caso, optimizar el uso de uno preexistente.

El regante debe estar en disposición de aplicar las técnicas de programación de riegos que permitan determinar el momento y la cuantía de cada riego.

La determinación de los índices de calidad de operación será base para asegurar que la dosis de agua sea aplicada con alta eficiencia utilizando pivotes fijos.

Los índices de calidad del riego en el reparto de agua en los sistemas de riego “pivotes fijos”, requieren un valor mínimo de Coeficientes de Uniformidad (CU) arriba de 80% para considerarlos aceptables. El CU es un indicador que solo proporciona la idea de la igualdad con que el agua de riego se reparte en los distintos puntos de la parcela, de esta manera valores bajos indican una incorrecta combinación del número y tamaño de boquillas, presión de trabajo (Tarjuelo, 1999). También se utilizan los conceptos de Uniformidad de Distribución (UD) y Eficiencia potencial de aplicación referida al 25% de las observaciones más desfavorables (EPA). Con la evaluación y mejora de los sistemas de riego permiten conseguir ahorrar agua, mano de obra, energía, preservar el suelo, etc. Así mismo, se asegura que la aplicación del Balance hídrico tenga éxito y de esta manera, la mejora de los rendimientos de los cultivos debido a que se aplican riegos oportunos en el momento que se requiera con un reparto aceptable.

4.1.1. La Uniformidad del riego

Se presentan los resultados de las 12 evaluaciones de campo que se realizaron en los pivotes fijos en los Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 en forma resumida (ver presentación de resultados Anexo II).

Basado en los resultados descritos en los Tablas del 4.1 al 4.4 se puede afirmar que los sistemas pivote fijos evaluados en la zona cañera guatemalteca operan con un Coeficiente de Uniformidad, CU, Heermann y Hein, (1968,) mencionado por Tarjuelo (1999) de 87%, valor promedio de las 13 pruebas realizadas, lo que significa que los sistemas están operando adecuadamente, en acuerdo con lo que indica Tarjuelo (1999) que considera que el agua del riego en la parcela está bien distribuida cuando se consigue un CU entre el 85 y 90% y con valores mayores al 90% la parcela está muy bien regada.

Sin embargo, la altura media de agua deseada (dosis neta, Dn), en mucho de los casos no llega a cubrirse tal como se muestra en los Tablas del 4.1 al 4.4 al compararse con la altura media descargada de los emisores y altura media del agua aplicada al suelo en el 25% del área menos regada que debe de coincidir con la dosis neta (Dn). En estas condiciones se está aplicando menos lámina que la requerida. Esta situación de aplicar menos que la altura media de agua deseada es producto a los problemas referidos a: la mala calidad del agua, en algunos casos; diseño agronómico e hidráulico inapropiado a las condiciones de suelo (la totalidad de los sistemas de pivotes fijos de la industria fueron comprados directamente por el fabricante, lo que se significa que solo fueron adoptados pero no adaptados a las condiciones propias), viento, tipo de operación, que se reflejan en el índice de eficiencia potencial de aplicación referida al 25% de las observaciones más desfavorables (EPA) que en las 12 pruebas realizadas fueron de 70.5%, índice que debería de ser mayor de 80%.

4.1.2. La Eficiencia del riego

Los sistemas de baja presión se caracterizan por regar dosis bajas en frecuencias cortas, para ejemplificar y observar el efecto uniformidad (ver Figura 4.1), se calculó una dosis neta (Dn) de 8.5 mm en cada riego (dosis basada en la reposición de agua a un 30% que equivale a dejar en el suelo un 70% de humedad residual a una profundidad radicular de 40 cm en la etapa de macollamiento, con una eficiencia del 85 % y una dosis bruta (Db) de 10 mm. Con base a la Dn requerida, se observa el comportamiento de dos curvas de distribución de frecuencias, una con un CU de 81% que presenta fracciones de área con volúmenes de agua percolada (VAP) e infra-regada (AIR) mayores que un sistema que opera con un CU de 92%.

Tabla 4.1. Resultados de las evaluaciones de campo en el periodo de zafra 2014/15. Estrato medio de la zona cañera guatemalteca

Finca	Cañaverales del sur	Santa Marta
ingenio	Madre Tierra	Madre Tierra
Georeferenciación	N14.28637 W91.09820	N13.990339 W90.756340
Marca	TL	Zimmatic
Funcionamiento	Hidráulico	Electrónico
Número de torres	09 + voladizo	09 + voladizo
Largo (m)	520	500
Area (has)	84.95	78.54
Fecha	20/01/2015	6/03/2015
Velocidad del viento (m/s)	1.07	1.58
Presión operación (kPa)	310.26	241.32
Q (m3/h)	204.39	181.68
Velocidad lineal (m/min)	0.912	1.15
Velocidad porcentual		32
Tiempo vuelta completa (h)	60	46
RESULTADOS		
	A	B
Altura media (mm)	13.2	13.4
Altura recibida <25%(mm)	10.5	11.2
altura de agua deseada(mm)	14.37	
Uniformidad de distribución UD (%)	79.6	83.3
Coefficiente de uniformidad CU (%)	87.5	89.8
Eficiencia potencial del cuarto <25% EPA(%)	75.53	69.31

Tabla 4.2. Resultados de las evaluaciones de campo en el periodo de zafra 2014/15. Estrato bajo de la zona cañera guatemalteca

Finca	El Minar		El Retiro (Piv_norte)		El Retiro (Piv_sur)	
ingenio	Madre Tierra		Madre Tierra		Madre Tierra	
Georeferenciación	N14.20464 W91.34587		N14.23622 W91.29962		N14.228324 W91.303002	
Marca	Zimmatic		Zimmatic		Zimmatic	
Funcionamiento	Electrónico		Electrónico		Electrónico	
Número de torres	09 + voladizo		08 + voladizo		09 + voladizo	
Largo (m)	510		440		490	
Area (has)	81.72		60.82		75.43	
Fecha	13/01/2015		14/01/2015		20/02/2015	
Velocidad del viento (m/s)	2.05		1.92		1.34	
Presión operación (kPa)	310.26		275.79		241.32	
Q (m3/h)	163.06		181.68		181.68	
Velocidad lineal (m/min)	1.16		1.10		1.12	
Velocidad porcentual	36		32		35	
Tiempo vuelta completa (h)	46		42		46	
RESULTADOS						
	A	B	A	B	A	B
Altura media (mm)	9.6	9.5	8.4	7.6	9.5	8.6
Altura recibida <25%(mm)	6.9	6.5	7.3	6.2	7.3	7.3
altura de agua deseada(mm)	9.20		12.51		11.03	
Uniformidad de distribución UD (%)	71.1	67.9	86.8	81.3	76.9	84.9
Coefficiente de uniformidad CU (%)	83.7	82.2	90.8	88.0	81.5	89.9
Eficiencia potencial del cuarto <25% EPA(%)	72.80		53.95		66.16	

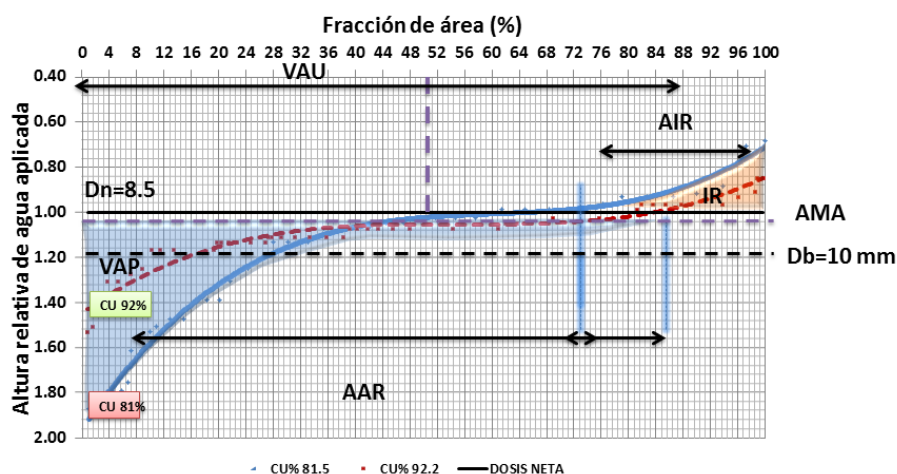
Tabla 4.3. Resultados de las evaluaciones de campo en el periodo de zafra 2014/15. Estrato litoral de la zona cañera guatemalteca.

Finca	Cantoira		Laguna Blanca		Santa Elena			
ingenio	Madre Tierra		San Diego					
Georeferenciación	N14.03414 W91.21884		N14.03414 W91.21884		N13.99138 W90.75091		N13.9914222 W90.75089722	
Marca	Zimmatic		Zimmatic		Zimmmatic		Zimmmatic	
Funcionamiento	Electrónico		Electrónico		Electrónico		Electrónico	
Número de torres	09 + voladizo		09 + voladizo		10 + voladizo		10 + voladizo	
Largo (m)	500		500		590		580	
Area (has)	78.54		78.54		109.36		105.69	
Fecha	8/01/2015		9/01/2015		13/02/2015		16/04/2015	
Velocidad del viento (m/s)	5.4		1		1.5		1.90	
Presión operación (kPa)	310.26		275.79		220.63		241.32	
Q (m3/h)	181.68		181.68		223.2		269.8	
Velocidad lineal (m/min)	0.6		0.6		1.34		1.42	
Velocidad porcentual	18		18		42		40	
Tiempo vuelta completa (h)	87		87		46		43	
RESULTADOS								
RADIO	A	B	A	B	A	B	A	B
Altura media (mm)	17.6	18.3	19.9	19.1	8.0	9.6	9.2	8.9
Altura recibida <25%(mm)	14.3	15.0	16.6	15.5	6.4	7.8	8.0	7.3
altura de agua deseada(mm)	20.19		20.19		9.39		10.92	
Uniformidad de distribución UD (%)	80.9	81.9	83.5	81.2	80.6	81.4	86.8	81.7
Coefficiente de uniformidad CU (%)	88.1	87.6						
			88.7	87.7	87.0	88.5	92.2	87.4
Eficiencia potencial del cuarto <25% EPA(%)	72.57		79.51		75.63		70.06	

Tabla 4.4. Resultados de las evaluaciones de campo en el periodo de zafra 2014/15. Estrato litoral de la zona cañera guatemalteca.

Finca	Alaska							
ingenio	Magdalena							
Georeferenciación	N14.433992 W 91.925367							
Marca	Zimmatic							
Funcionamiento	Electrónico							
Número de torres	14 + voladizo							
Largo (m)	745							
Area (has)	174.37							
Fecha	28/04/2015		4/05/2015		11/05/2015		14/05/2015	
Velocidad del viento (m/s)	0.7		0.7		0.76		0.69	
Presión operación (kPa)	241.32		241.32		241.32		241.32	
Q (m3/h)	442.8		442.8		442.8		442.8	
Velocidad lineal (m/min)	0.46		0.77		1.08		1.39	
Velocidad porcentual	15		25		35		45	
Tiempo vuelta completa (h)	168.9		101.28		72.24		56.16	
RESULTADOS								
RADIO	A	B	A	B	A	B	A	B
Altura media (mm)	35.0	36.6	24.9	23.4	19.6	14.5	12.5	14.2
Altura recibida <25%(mm)	27.6	28.8	17.9	18.2	14.5	11.6	9.3	11.8
altura de agua deseada(mm)	42.89		25.72		18.34		14.26	
Uniformidad de distribución UD (%)	79	78.9	72.1	78.1	74.2	80	74.4	83.1
Coefficiente de uniformidad CU (%)	86.6	88.1	83.8	87.6	82.3	87.7	85.3	88.2
Eficiencia potencial del cuarto <25% EPA(%)	65.75		70.18		71.14		73.98	

Es importante considerar que al mejorar el CU aumenta el área adecuadamente regada (AAR) de un 73 a 85%. Si se considera un 87.5% de área regada adecuadamente, el sistema de riego que opera con un CU del 81% está regando con un VAU de 7.65 mm, que equivale a 0.85 mm debajo de lo requerido por el cultivo, mientras que con un sistema que opera con CU de 92% aplicó un VAU de 8.25 mm, valor muy cercano al requerimiento.



Dn= Altura relativa de agua equivalente a la dosis neta

AMA = Altura media de agua aplicada en el terreno

VAU= Volumen de agua utilizada por el cultivo

VAP= Volumen de agua percolada

AIR= Área infrarregada

IR= Volumen déficit

AAR= Área adecuadamente (o sobre) regada.

Figura 4.1. Curvas de distribución de frecuencia adimensional de dos sistemas pivote central que operan en la zona cañera guatemalteca.

La mejora del CU incrementa el área que se riega adecuadamente y debe ser una labor continua. Las evaluaciones que se realicen para determinar la calidad del riego en los sistemas pivote fijo ayudaran a determinar las mejoras que permitan aumentar la uniformidad y eficiencia. En Tabla 4.5 se expone una serie de acciones a seguir para mejorar el CU en los sistemas de pivote fijo, según los parámetros: agua, suelo, clima y operación.

Tabla 4.5. Acciones a seguir para mejorar el Coeficiente de uniformidad (%CU) basado en los problemas encontrados en la operación de sistemas pivote central en la zona cañera guatemalteca.

Parámetro	problema	Acciones a seguir
agua	Reducción de caudal por Incremento de sarro en las tuberías de conducción y aspersores por presencia de Fe y Mg principalmente.	Lavados de la tubería dos veces al año
suelo	Formación de escorrentía por alta intensidad de la aplicación del riego, especialmente en suelos con presencia arcilla (F. arcillosos, arcillosos)	Diseño agronómico e hidráulico para seleccionar adecuadamente la longitud de las torres, selección de emisores y velocidad de desplazamiento.

clima	Incremento del viento en el día del período de 11 a 15 horas	La elevación de los emisores debe ser acorde a la altura de la caña de azúcar. Si el viento es mayor a 2.7 m/s parar el sistema en ese período
operación	Falta de verificación y mantenimiento	Seguir las normas de mantenimiento y control establecidos en el desempeño de los aspersores (tipo, rotación y tamaño de boquillas), presión del sistema, flujo de agua, estado de la tubería (empaques, fugas, largo de tubería, entre otros) e intensidad de aplicación

4.2. FACTORES ATMOSFÉRICOS QUE AFECTAN EL REQUERIMIENTO DE AGUA EN LA LATITUD 14°N 90°O

4.2.1. Demanda climática (ET_o)

Determinar los consumos de agua por parte de los cultivos, y la caña de azúcar en particular, y por extensión los requerimientos hídricos netos y brutos de riego, es una de las principales tareas de la ingeniería del riego.

Necesidades hídricas se identifican con evapotranspiración (ET) en un determinado ambiente, caña de azúcar en este caso, y bajo un determinado manejo.

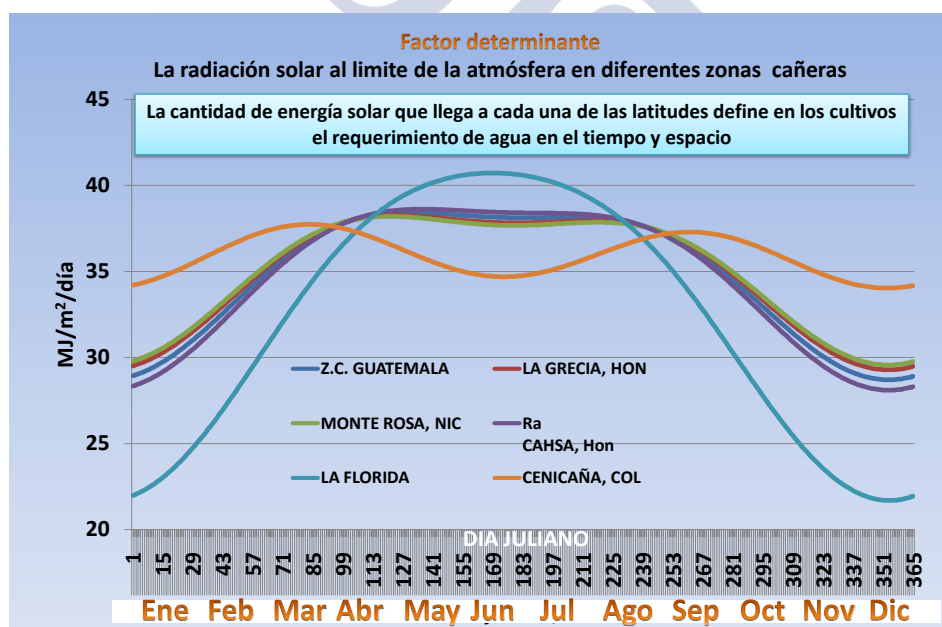
La ET es, básicamente, la suma de dos procesos: la transpiración de la cubierta vegetal y la evaporación de agua desde el suelo que la soporta.

Uno de los modos de cuantificar ET es mediante el uso de modelos a partir del registro y procesado de variables climáticas. Uno de los modelos más difundidos en la determinación de ET es el de Penman-Monteith, a partir de parámetros relativos a la cubierta vegetal, o mediante una estimación que precisa: uno, calcular la demanda evaporativa debida a las condiciones climáticas la evapotranspiración de referencia (ET_o), y dos, considerar las especificidades de la caña de azúcar mediante un coeficiente de cultivo (K_c).

Las variables más importantes que inciden en el comportamiento de la demanda climática (ET_o), base para la determinación del requerimiento de agua en caña de azúcar, la constituyen: la radiación solar, la temperatura, humedad relativa y la velocidad del viento. El comportamiento de estas variables depende de la ubicación latitudinal y longitudinal del lugar. En el caso de la zona cañera guatemalteca el comportamiento de la energía en el tiempo y espacio es muy importante.

4.2.1.1. Comportamiento de la energía solar que llega al límite de la atmósfera según ubicación latitudinal

Uno de los factores más importantes que contribuyen al comportamiento del requerimiento de agua, es sin lugar a dudas, la cantidad de energía que llega en cada una de las latitudes; en la medida que en las zonas productoras de caña de azúcar se ubican del ecuador hacia el Norte o Sur, los requerimientos de agua serán muy diferentes en el año, tal como se puede observar en la Figura 4.2.



Nota: Las latitudes en cada uno de los sitios indicados es el siguiente: Canal Point, La Florida, EE UU 26°; Zona cañera de Guatemala, latitud 14°; Ingenio La Grecia, Sur de Honduras 13°; Ingenio Monte Rosa, Sur de Nicaragua 12°; Ingenio Santa Matilde, Norte de Honduras 15°; CENICAÑA, Colombia 3°.

Figura 4.2. Radiación solar al límite de la atmósfera que llega en el año en diferentes zonas cañeras ubicadas en el Norte, Centro y Sur América

La energía solar que llega al límite de la atmósfera en seis zonas productoras de caña de azúcar. Se visualiza que el comportamiento de la energía que llega en el Valle del Cauca, Colombia, determina que el requerimiento de agua en todo el año sea muy similar, caso contrario ocurre en la zona de Canal Point, Florida, donde los requerimientos de agua son muy altos entre abril y agosto y un requerimiento muy bajo en el resto del año. Para el caso particular de Centro América (zonas cañeras de Honduras y Nicaragua), la energía que llega a las zonas productoras es similar en todo el año.

Para el caso específico de la latitud 14° N 90° O, el comportamiento de la distribución de la energía solar que llega al límite de la atmósfera en cada uno de los años define los periodos máximos o mínimos del requerimiento de agua en caña de azúcar. Como se observa en la Figura 4.3, en todos los años, el mayor requerimiento de agua en caña de azúcar se presenta entre el 18 de abril al 20 de agosto, este comportamiento de energía no solo está ligado al comportamiento del requerimiento de agua de la caña de azúcar, sino también, al comportamiento de la inducción floral a partir del 20 de agosto, día en que empieza a reducirse de forma natural la energía, hasta llegar a el 21 de diciembre, luego de esa fecha, nuevamente empieza a incrementarse, hasta llegar al 18 de abril, lo que constituye un ciclo permanente en todos los años.

Para el período normal de riego, la energía más baja se recibe del 15 de noviembre al 15 de enero, período que coincide con el primer tercio donde se presentan los requerimientos más bajos de agua. El comportamiento de energía durante el período de riego determina que los valores críticos de requerimiento de agua se ubican específicamente en el mes de abril (Ver Figura 4.4).

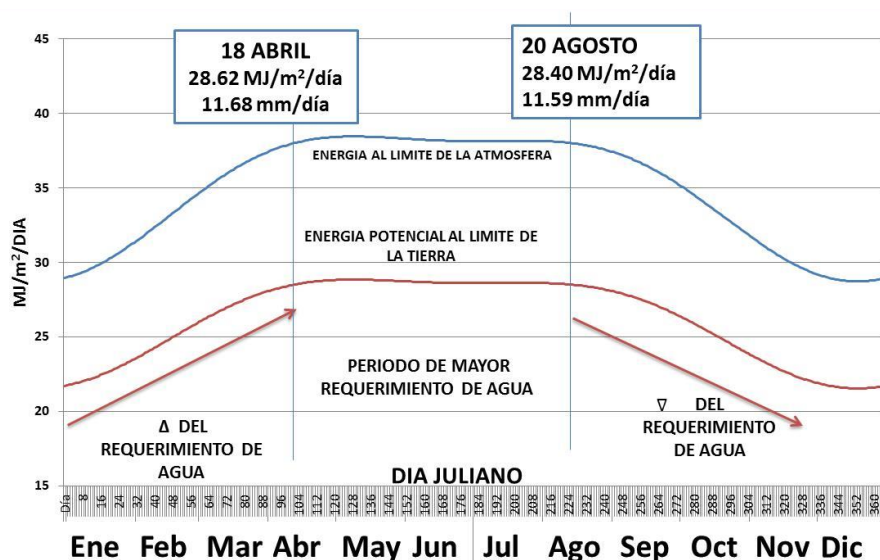


Figura 4.3. Energía solar potencial al límite de la atmósfera y energía potencial en la tierra en cada uno de los meses del año en la latitud 14°.

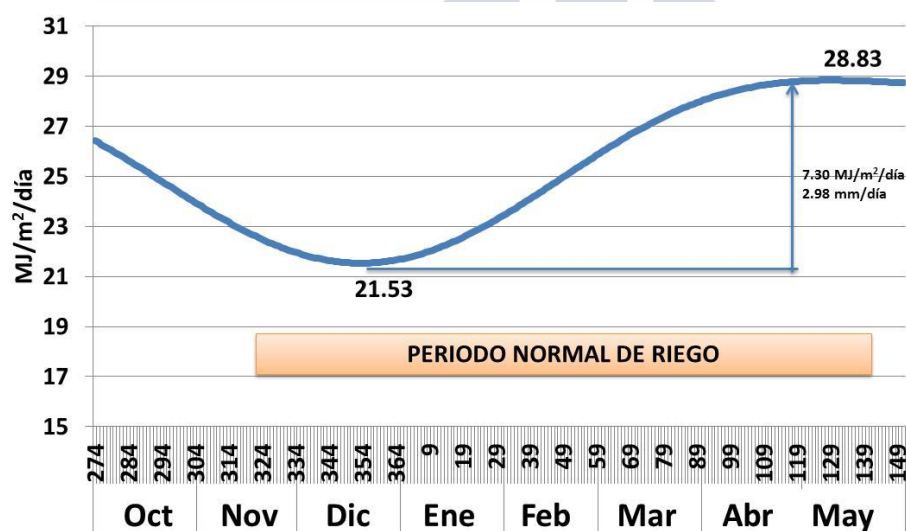


Figura 4.4. Energía solar potencial al límite de la tierra en la latitud 14° durante el período de riego que va del 15 de noviembre al 15 de mayo, zona cañera guatemalteca.

4.2.1.2. Comportamiento de la energía solar global que llega a la superficie terrestre

La energía solar global, constituye el principal factor que determina el comportamiento del requerimiento de agua a través del parámetro ETo. El factor energético en la superficie terrestre contribuye al comportamiento de la ETo de dos formas diferentes: una, el comportamiento paralelo entre la energía potencial que llega a la superficie terrestre y la ETo. En diciembre en

ambos parámetros, los valores son más bajos y en abril son más altos, dos, referido a la cantidad de radiación en el día, en este caso los valores altos de ETo que se observa en la Figura 4.5, representan los días con poca nubosidad, mientras que los valores bajos representan los días con mucha nubosidad y baja energía solar en la superficie terrestre. Lo que confirma la importancia de la energía solar que llega a la superficie terrestre medido con el piranómetro SP-lite. El mismo comportamiento de energía y la ETo de la Figura 4.5, es el que se observa en todos los años, con la diferencia de que, en cada año, el comportamiento de la nubosidad es diferente a causa de fenómenos naturales.

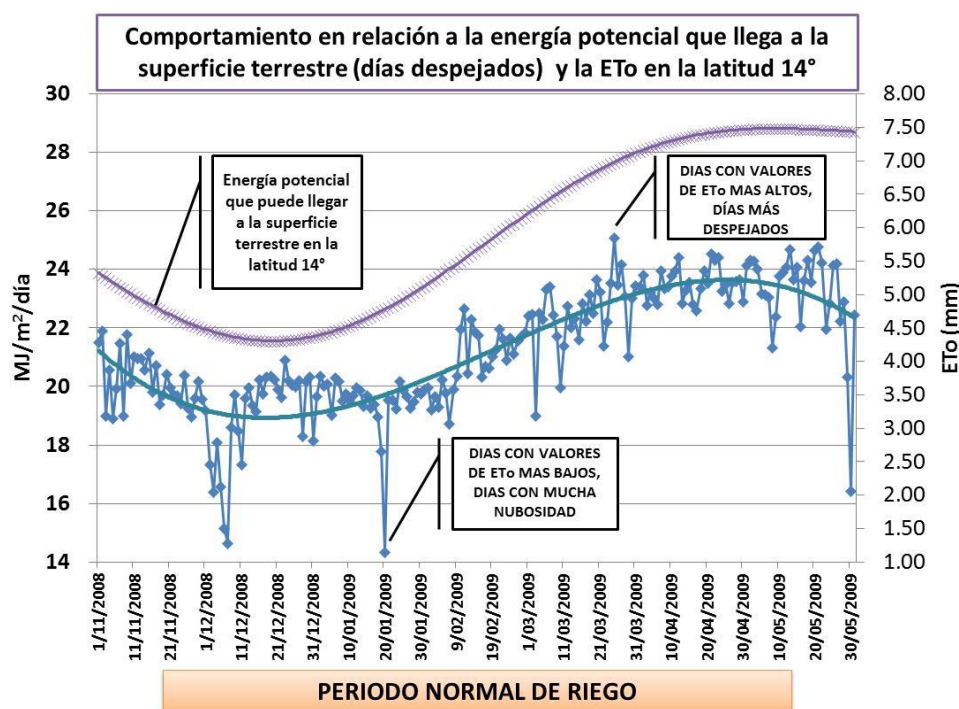


Figura 4.5. Comportamiento en relación a la energía potencial que llega a la superficie terrestre (días despejados) y la ETo en la latitud 14°. Ejemplo de comportamiento de la ETo en el periodo de riego 2008/09.

4.2.1.3. Efectos en la demanda climática (ETo) a causa del fenómeno natural ENSO

La incidencia y comportamiento de fenómenos naturales, como el conocido ENSO (Nombre científico del Niño o La Niña). El ENSO tiene dos fases: cálido (Niño) y frío (Niña). Dicho fenómeno altera el clima en todo el mundo y la latitud 14° no es la excepción, es un fenómeno Océano Atmosférico importante que hace la diferencia en cada uno de los años en el comportamiento de la demanda climática y requerimiento de agua en caña de azúcar. De esta manera se determina que el mayor efecto de este fenómeno es precisamente en el comportamiento de la energía solar que llega en la superficie terrestre, como se observa en la Figura 4.6, en la relación Radiación global y la ETo, en marzo y abril (periodo crítico), se

pueden presentar dos tipos de comportamiento; uno, en un período de ENSO cálido, en este caso, existen días con mayor radiación global, que van de 20 a 26 MJ/m²/día lo que implica un mayor requerimiento de agua tal como se observa en el modelo de ENSO cálido de la Figura 4.6, y dos, en un período de ENSO frío, en el cual existen mayor cantidad de días con menor radiación que van de 12 a 20 MJ/m²/día lo que resulta un menor requerimiento de agua comparado con un período de ENSO cálido. Como el caso de Bonanza, este mismo comportamiento se observa en toda la zona cañera guatemalteca.

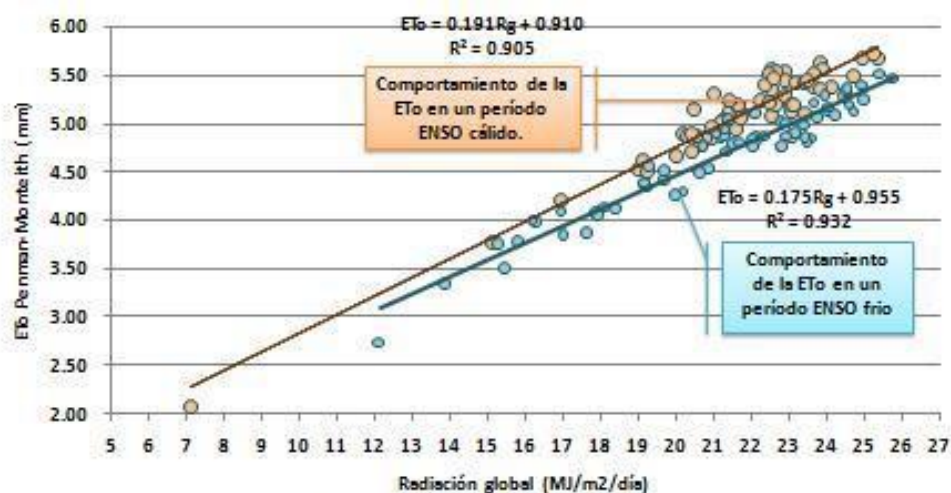


Figura 4.6. Efectos del ENSO en los meses críticos marzo-abril para la relación: Radiación solar y ETo. ENSO cálido 2010 (color anaranjado) y ENSO frío 2011 (color celeste) datos de la estación meteorológica “Bonanza” ubicada en el estrato litoral a 29 msnm.

Es importante considerar que en los períodos de ENSO frío se presentan más frentes fríos que afecta significativamente el requerimiento de agua en caña de azúcar, el frente frío es un fenómeno que proviene del Norte en el período de noviembre a marzo principalmente, aunque pueden presentarse frentes precoces y tardíos; en todo caso, los que inciden enero y febrero son los que causan más daño debido a que se incrementa desmedidamente el requerimiento de agua, estos se mueven rápidamente, son fuertes y pueden causar incrementos en las rachas de viento mayores a 20 Km/h de Norte a Sur durante el día. En la Figura 4.7 se puede visualizar claramente que el efecto del viento en el incremento del requerimiento de agua mayores a 5 mm regularmente comienza a ocurrir a partir de las velocidades de viento promedio del día mayores a 10 Km/h, pero los efectos desmedidos del viento en el requerimiento de agua se presentan cuando el viento durante el día es mayor a 25 Km/h.

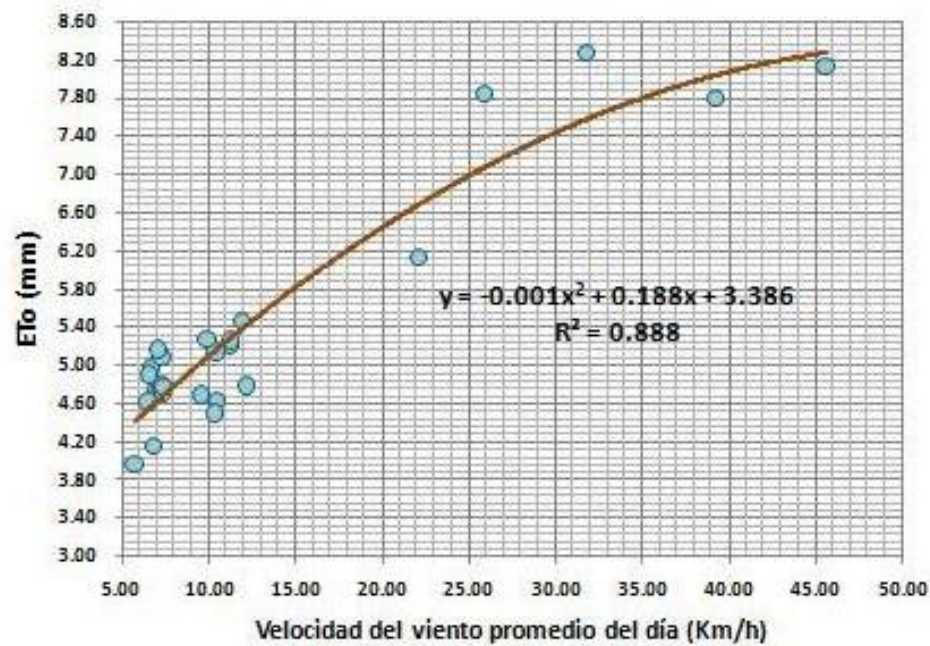


Figura 4.7. El efecto de la velocidad del viento en la ETo (Estimado con Penman-Monteith). Ejemplo de lo ocurrido en febrero 2,009 (incremento del viento causado por un frente frío en un período ENSO frío), latitud 14° N longitud 90° O.

El máximo requerimiento de agua potencialmente se observa del 18 de abril al 20 de agosto, al final de ese período ocurre en todos los años el fenómeno conocido como “canícula”, que se caracteriza por disminuir la lluvia, normalmente en el período del 15 de julio al 15 de agosto, sin embargo, la disminución de la ETo es más severa en años de ENSO frío como se observa en la Figura 4.8.

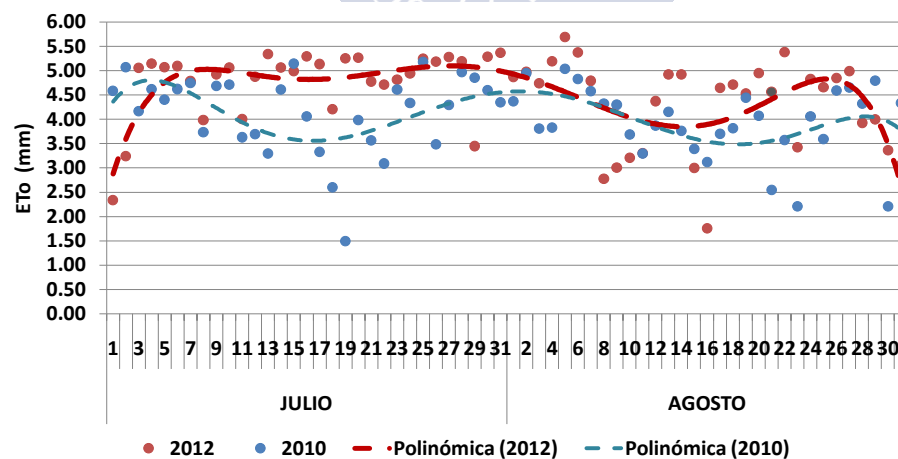


Figura 4.8. Comportamiento del requerimiento de agua (ETo Penman Monteith) en el período de lluvia en el estrato litoral, de la latitud 14°N longitud 90°O, caso de los años 2010 (ENSO frío) y 2012 (ENSO neutro), registros de la estación meteorológica “San Antonio El Valle” ubicada en el estrato litoral a 10 msnm.

4.2.1.4. Propuestas técnicas para el ahorro de agua en sistemas “pivote fijo”

La optimización del uso del agua permitirá balancear el uso de agua según la época en que se realice el riego, de esta manera se propone las técnicas siguientes:

i. seleccionar el valor de la demanda climática en la planificación del riego

La selección del valor de la demanda climática cobra importancia, principalmente, cuando se diseña un sistema de riego y/o se planifica la lámina o dosis de agua para cada uno los sistemas de riego. En el caso particular de la latitud 14°N y longitud 90°O, la selección del valor para diseño debe ser de 5.5 mm/día, valor razonado y seleccionado dentro de un período considerado crítico con una probabilidad de ocurrencia de 75%, valor que garantiza que el sistema funcione adecuadamente a los requerimientos más críticos que se pueda presentar entre marzo y abril. Para la planificación del riego, con un sistema de riego “pivote fijo” se deben de utilizar los valores de requerimiento de agua máximos indicados en la Figura 4.9 y debe de seleccionarse con base al mes en que se planifica el riego. Dichos valores de requerimiento de agua indicados deben de multiplicarse con los valores de K_c según etapa fenológica. Por ejemplo, si se planifica el riego pre-corte (etapa de elongación) en los meses de noviembre y diciembre y el valor de K_c seleccionado es de 0.9, entonces, la lámina neta resultante sería $4.3 \times 0.9 = 3.87$ mm/día, si el sistema que se utiliza opera con una eficiencia de 75 %, la lámina bruta a considerar sería de 5.16 mm/día, ahora para los meses de enero y febrero, la lámina neta a considerar sería 4.5 mm/día, para marzo y abril 4.95 mm/día con el mismo valor de K_c .

Para planificar el riego en caña de azúcar en la latitud 14°N longitud 90°O utilizar los valores de K_c recomendados por Cengicaña (página 191 del libro de caña de azúcar editado por Cengicaña 2012).

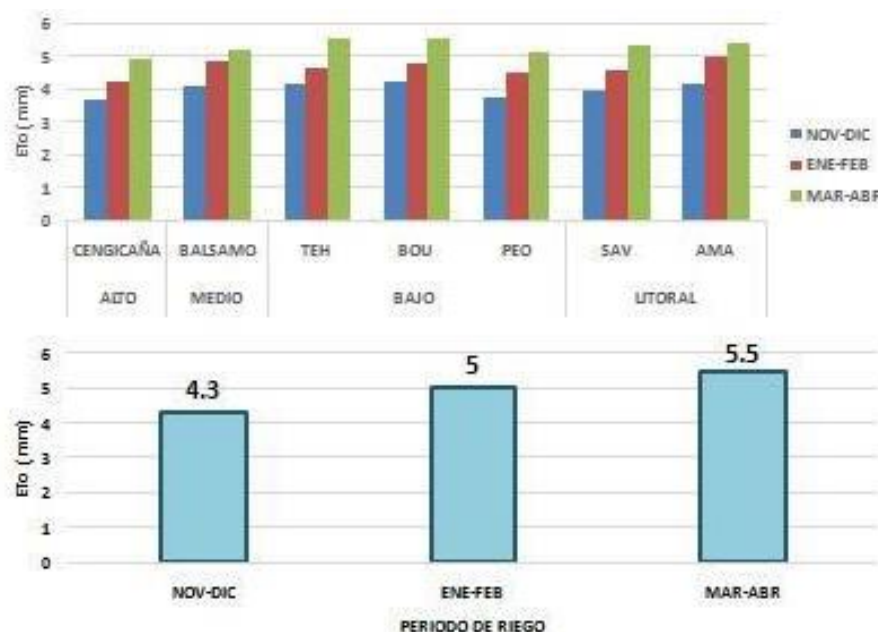


Figura 4.9. Requerimiento de agua máximo (Definida a través de la estimación de la ETo por Penman-Monteith) que se propone con fines de planificación del riego según tercio de zafra en la latitud 14°N longitud 90°O.

ii. seleccionar técnicas para reducir los efectos de la velocidad del viento

En las áreas con incidencias de viento promedio en el día mayor a 10 Km/h durante los meses de enero a marzo, en el diseño agronómico del sistema deben de considerar la velocidad del viento con una variable crítica para la selección de aspersores y presiones de operación en los sistemas “pivote fijo”, considerando sus efectos: en la uniformidad del agua en la parcela e incremento en el requerimiento de agua, el cual debe de realizarse estudios específicos previos en el lugar a través del análisis de ETo Penman-Monteith.

iii. aplicar técnicas de riego según período ENSO

En todos los años, la mayor demanda climática se presenta entre el 18 de abril al 20 de agosto, las técnicas de planificación deben de considerar el mayor requerimiento de agua de 5.5 mm/día, principalmente en los años ENSO cálido. La energía solar global, constituye el principal factor que determina el comportamiento del requerimiento de agua. En un período de ENSO cálido, existen días con mayor radiación global, que van de 20 a 26 MJ/m²/día lo que implica requerimientos de agua mayores a 5 mm/día, mientras que un período de ENSO frío, existen mayor cantidad de días con menor radiación que van de 12 a 20 MJ/m²/día lo que resulta requerimiento de agua menores a 4 mm/día. En los períodos de ENSO frío se presentan frentes fríos, estos incrementan la velocidad del viento con rachas mayores a 10 Km/h, lo que también incrementa el requerimiento de agua en caña de azúcar con valores mayores a 6 mm/día.

4.3. SOFTWARE CENGIRIEGOS (SC)

4.3.1. Ingreso al sitio SC

Dentro de las características generales está la forma de ingresar a la dirección web y luego la forma de aceptación del usuario para el ingreso al SC. La dirección de ingreso al sitio Cengirriegos es <http://riegos.cengicana.org/auth/login> y la solicitud de registro, tal como se observa en la Figura 4.10.

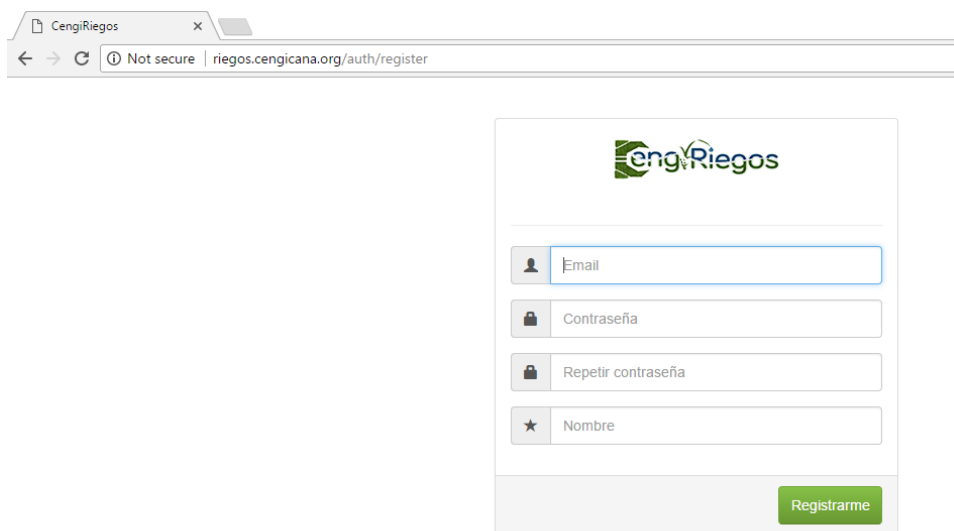
The image shows a web browser window with the address bar displaying "riegos.cengicana.org/auth/register". The page features the "CengRriegos" logo at the top. Below the logo, there is a registration form with four input fields: "Email" (with a person icon), "Contraseña" (with a lock icon), "Repetir contraseña" (with a lock icon), and "Nombre" (with a star icon). A green "Regístrame" button is located at the bottom right of the form. A large, faint watermark of the University of Cádiz is visible in the background.

Figura 4.10. Solicitud de registro para ingresar a Cengirriegos. Fuente Cengicaña, 2016.

4.3.2. Ingreso de usuario

Para tener acceso deberá solicitar permiso al administrador del SC, con el aval del gerente de campo del ingenio al cual pertenece. En la Figura 4.11 se observa un ejemplo de despliegue de ingreso de usuario.

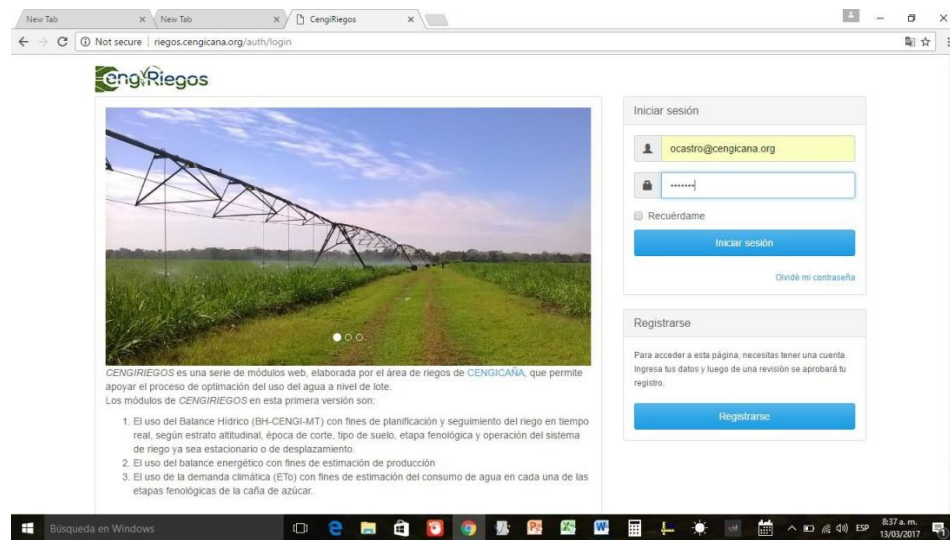


Figura 4.11. Página de Ingreso de usuario, Cengirriegos. Fuente Cengicana 2016

4.3.3. Operación del SC

Para operar el SC, se utilizará tres iconos como se observa en la Figura 4.12, los cuales están referidos a una ventana de inicio (1), a la segunda riegos (2) y a la tercera agrometeorología (3).

4.3.3.1. Inicio

Al ingresar a la ventana de inicio, se mostrará directamente el esquema con que opera el SC, acción que ejecutará por lote, en la ventana de *inicio* se debe seleccionar el período de zafra a trabajar, ya sea para tiempo real o de zafras anteriores según base de datos introducida para tal fin. (Figura 4.12).

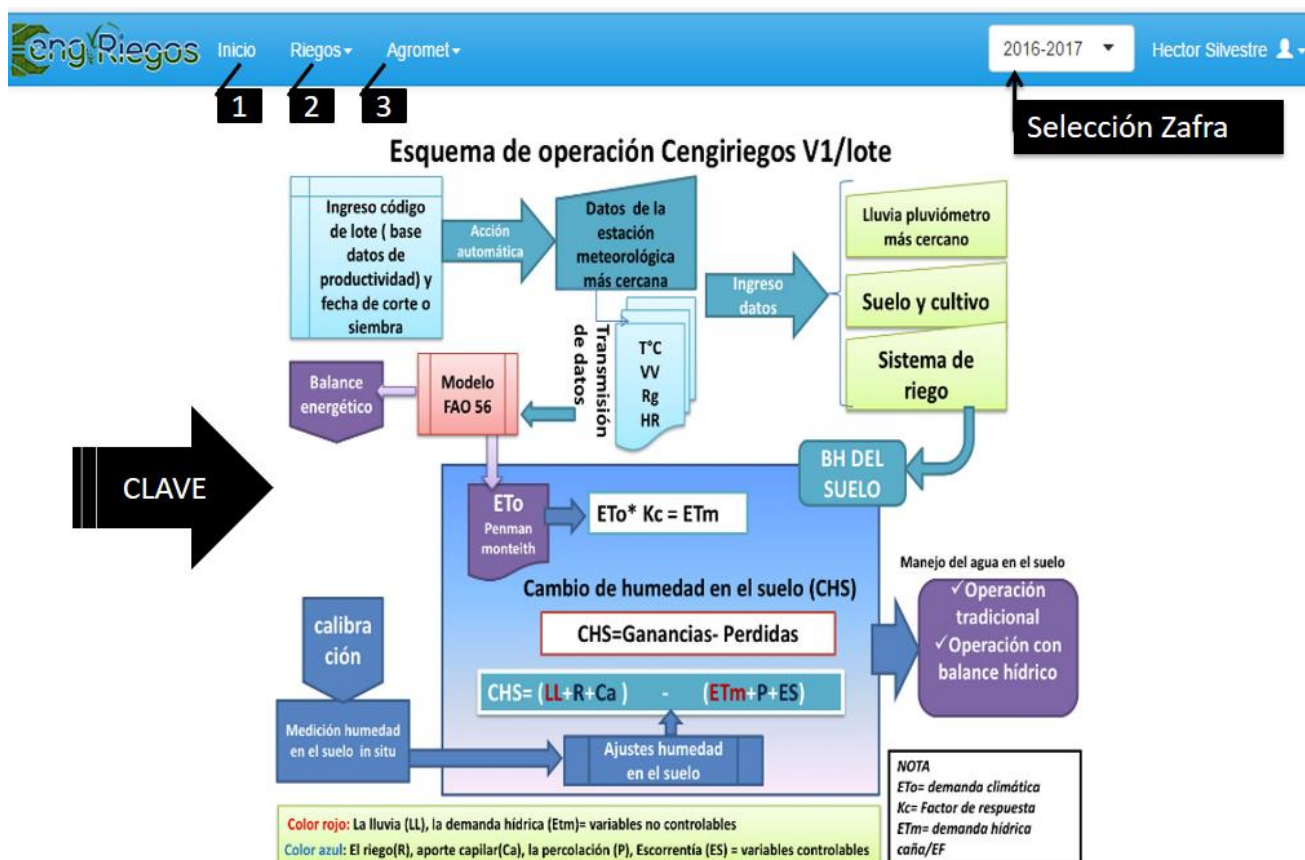


Figura 4.12. Ventana de inicio donde se muestra el esquema general de operación del SC.

4.3.3.2. Módulo riegos

Los pasos a seguir para cargar y/o consultar información en el módulo de riegos son los siguientes (ver Figura 4.13):

1. Ingresar a la ventana *Riegos*.
2. Si se quiere *cargar información y/o consulta* seleccionar el icono de planificación y ejecución de riegos, luego seleccionar *Lotes*.
3. En el caso de ***Carga de información*** están las alternativas siguientes: *importar información de lotes incluidos en la base datos productividad (opción nuevo análisis)* de ingenios asociados e *importar lotes nuevos no incluidos en la base datos productividad (opción importar lotes nuevos)*, esto aplica en casos especiales diseñados para lotes dentro y fuera de la zona cañera guatemalteca que no están en la base de datos de productividad, tal es el caso de los ingenios azucareros asociados de Centro América). Para completar la información de los lotes en ambas opciones se solicita información de caña de azúcar, suelo, riego y lluvia.



Figura 4.13. Ingreso al módulo de riegos en el SC.

4. Al introducirse al icono de Carga de información de *caña de azúcar (Cultivos)*, se tendrá dos opciones, una **importar características** y dos, **actualizar características**.
5. Si no se quiere ingresar la información lote por lote, se creó la opción de **importar características de la caña de azúcar** requerida a través de Excel dado a la gran cantidad de lotes que se manejan, para el cual se tendrá que recolectar la información basada en la matriz que se indica en la Figura 4.14.

En el proceso de importación será necesario guardar el archivo de Excel en el formato CSV con el orden de datos solicitados, **sin** escribir el nombre de la columna, solo los datos. Será importante respetar el formato de fechas indicadas y si existen celdas vacías se usará el dato predeterminado. Con esta opción, se podrá importar información en *n* lotes al mismo tiempo. La acción de carga de información de caña de azúcar se realiza solo una vez en el ciclo de cultivo.

Cultivos

- [Importar características](#)
- [Actualizar características](#)

Riegos - Planificación y ejecución de riegos - Lotes - Cultivos - Importar características [2016-2017]

Ingresar un archivo .CSV con el siguiente formato, respetando el formato de fechas indicado. Si un dato va vacío se usará el predeterminado.

A*	B	C*	D*	E*	F*	G*	H	I	J	K*	L*	M*	N*	O*	P*	Q*	R*	S*	T*	U*	V*
Lote	Código Sistema riego	Variedad	Código ingenio	Código equipo	Cortes	Área riego	Deficit permitido (0.8)	Eficiencia riego (0.8)	Lámina inicial (0)	Fecha siembra DDMMYYYY	Fecha próximo corte DDMMYYYY	Duración Iniciación	KC Iniciación	Prof. Radicular Iniciación	Duración Macollamiento	KC Macollamiento	Prof. Radicular Macollamiento	Duración Elongación I	KC Elongación I	Prof. Radicular Elongación I	Duración Elongación II

Códigos de sistemas de riego (Columna B)

2	Gravedad - aspersión
3	Aspersión tipo cañon (alta presión)
4	Mecanizados pivote (baja presión)
5	Miniaspersión (mediana presión)
6	Goteo
7	Mecanizados frontal (baja presión)
8	Sin riego
9	Mediaspersión
10	Gravedad

W*	X*	Y*	Z*	AA*	AB	AC
KC Elongación II	Prof. Radicular Elongación II	Duración Maduración	KC Maduración	Prof. Radicular Maduración	Código pluviómetro	Administración

Seleccionar archivo

 No se eligió archivo

Importar

Figura 4.14 Matriz para importar características de caña de azúcar a través de Excel en el SC.

6. Para la opción de **actualizar características** de la caña de azúcar, se solicita llenar la matriz indicada en la Figura 4.15, y utilizar el mismo proceso de importación indicada en el párrafo anterior. La acción de carga de información de actualización de características de caña de azúcar se debe realizar solo una vez en el ciclo de cultivo.

Caña de azúcar

- [Importar características](#)
- [Actualizar características](#)

Riegos - Planificación y ejecución de riegos - Lotes - Cultivos - Actualizar características [2016-2017]

Ingresar un archivo .CSV con el siguiente formato. Solo se actualizan las columnas con valores.

A*	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Lote	Código Sistema riego	Variedad	Código ingenio	Código equipo	Cortes	Área riego	Deficit permitido	Eficiencia riego	Lámina inicial	Código pluviómetro	Administración

Códigos de sistemas de riego (Columna B)

2	Gravedad - aspersión
3	Aspersión tipo cañon (alta presión)
4	Mecanizados pivote (baja presión)
5	Miniaspersión (mediana presión)
6	Goteo
7	Mecanizados frontal (baja presión)
8	Sin riego
9	Mediaspersión
10	Gravedad

Seleccionar archivo

 No se eligió archivo

Importar

Figura 4.15. Matriz para importar actualizaciones de caña de azúcar a través de Excel en el SC

7. En el icono de Carga de información de suelos, se tendrá la opción de **importar características** a través de Excel, para el cual se tendrá que recolectar la información de suelos basado en la matriz que se indica en la Figura 4.16. En el proceso de importación será necesario guardar el archivo de Excel en el formato CSV con el orden de datos solicitados, sin escribir el nombre de la columna, solo los datos. Es importante respetar el formato de fechas indicadas y en el caso de no disponer información sobre CC, PMP y Da, solo será necesario la información de textura del suelo. La acción de carga de información de suelos se realiza solo una vez en el ciclo de cultivo.



Riegos - Planificación y ejecución de riegos - Lotes - Suelo - Características edáficas [2016-2017]

Ingresar un archivo .CSV con el siguiente formato, respetando el formato de fechas indicado. Si un dato va vacío se usará el predeterminado.

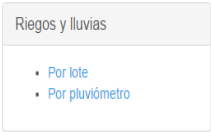
A*	B*	C*	D*	E*	F*	G*
Lote	De	A	Textura	CC	PMP	DAP

Seleccionar archivo No se eligió archivo

Importar

Figura 4.16. Matriz para importar características de suelos a través de Excel en el SC.

8. En el icono de Carga de información de riegos, lluvia y ajustes por humedad en el suelo (entradas constantes al sistema), se tendrá la opción de **importar características** a través de Excel, para el cual se recolectará la información utilizando la matriz que se indica en la Figura 4.17. En el proceso de importación será necesario guardar el archivo de Excel en el formato CSV con el orden de datos solicitados, sin escribir el nombre de la columna, solo los datos. La acción de carga de información debe realizarse todas las veces en que se realiza el riego, se produzca un evento de lluvia o se realice ajustes por humedad en el suelo en todo el ciclo de cultivo.



Riegos - Planificación y ejecución de riegos - Lotes - Riegos y luvias - Por lote [2016-2017]

Ingresar un archivo .CSV con el siguiente formato, respetando el formato de fechas indicado. Si la lluvia se deja en blanco, se dejará el dato actual.

A*	B*	C*	D	E*
Lote	Fecha (DD/MM/YYYY)	Riego	Lluvia	Ajuste de humedad

Seleccionar archivo No se eligió archivo

Importar

Figura 4.17. Matriz para importar información de eventos de riego, lluvia y ajustes de humedad a través de Excel en el SC.

9. Si se tiene definido el área de influencia del pluviómetro manual existente en la finca, se tendrá la opción *por pluviómetro* en el icono de riegos y lluvias, para el cual se tendrá que llenar la información indicada en la Figura 4.18.
10. En el proceso de importación será necesario guardar el archivo de Excel en el formato CSV con el orden de datos solicitados, sin escribir el nombre de la columna, solo los datos. La acción de carga de información se debe realizar todas las veces en que se produzca un evento de lluvia en todo el ciclo de cultivo.

Riegos y lluvias

- Por lote
- Por pluviómetro

Riegos - Planificación y ejecución de riegos - Lotes - Riegos y lluvias - Por pluviómetro [2016-2017]

Ingresar un archivo .CSV con el siguiente formato, respetando el formato de fechas indicado.

A*	B*	C*	D*
Código de ingenio	Código de pluviómetro	Fecha (DD/MM/YYYY)	Lluvia

Seleccionar archivo No se eligió archivo

Importar

Figura 4.18. Matriz para importar información de eventos de lluvia según influencia del pluviómetro manual a través de Excel en el SC.

11. **Para las Consultas en el módulo de riegos**, después de haber realizado la acción de carga de información, ya se puede realizar consultas a través del icono consulta en el cual se podrá visualizar la *base de lotes*, *gráficos*, *seguimiento de humedad* y *planificación del riego*. Al introducirse al icono de *base de datos* se tendrá la opción de *buscar* con solo introducir el código de lote o código de equipo. También se podrá agregar un nuevo lote a través del icono *agregar*.

La **consulta** puede estar dirigida a visualizar la información de riego/lluvia/ajuste de humedad a través del icono de **la gotita**, así también, sobre las características físicas de suelo a través del icono del **cuco de suelo** (Ver Figura 4.19). En la **consulta** también se puede visualizar los reportes de gráficos, realizar ediciones o eliminar todo lo relacionado al lote o equipo, tal como se observa en la Figura 4.19.

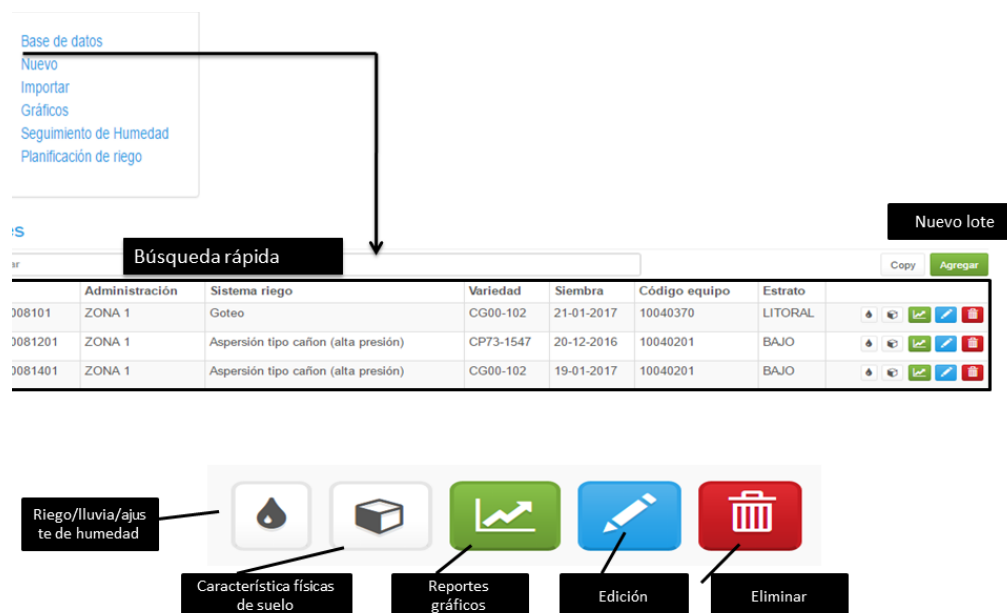


Figura 4.19. Opciones de consulta de lotes en el SC.

12. También en la opción de **consulta**, el icono de **edición** debe ser una acción importante, dado que nos permitirá verificar la información, corregir y actualizar en el caso de eventos de riego, lluvia o ajuste de humedad, lote por lote, ver las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22. En el caso de la Figura 4.22 será determinante que la información de la eficiencia de uniformidad del sistema de riego, sea con sus mejoras y medida en el campo. Así mismo, el parámetro de déficit permitido de manejo o umbral de riego sea mayor 0.60.

Al ingresar el código de lote

Lote: 07-0130403

Ingenio: MADRE TIERRA
Finca: El Retiro
Estrato: BAJO
Latitud: 683304.170000
Longitud: 1573428.340000

Variedad: CP73-1547

Cortes: 3

Fecha resiembra/corte: 12/01/2016

Fecha próximo corte: 12/01/2017

Riego: Aspersión tipo cañon (alta presión)

Código equipo: F02010

Área física de cobertura: 22.47

Si cambia alguna de las fechas o las duraciones de las etapas, se eliminarán y recalcularán los índices de riegos y lluvias

Características agronómicas del cultivo

Etapa	Duración	Finalización	Kc	Prof. radicular (cm)
Iniciación	45	26/02/2016	0.30	30
Macollamiento	90	26/05/2016	0.60	40
Elongación I	115	18/09/2016	0.90	60
Elongación II	65	22/11/2016	1.00	60
Maduración	50	11/01/2017	0.60	60

Figura 4.20 Despliegue de edición por lote del componente caña de azúcar. SC.

Características edáficas del suelo - Lote 07-0130403

*Si no se tienen valores de suelo, dejarlos en 0 para obtener el LAA por defecto para el tipo de suelo.

Cálculo

Estado		Textura	%CC	%PMP	D.A.P. (gr/cc)	LAA (mm)
De	A					
0	20	Arena Franca	9.670000	5.800000	1.470000	11.38
20	40	Arena Franca	7.620000	4.890000	1.470000	8.03
40	60	Arena Franca	5.340000	3.060000	1.530000	6.98

Guardar **Click**

Figura 4.21 Despliegue de edición por lote del componente suelo. SC.

- Lote 07-0130403

Guardar

Eficiencia riego: 0.80 ← Medición campo

Déficit permitido: 0.30 ← Criterio técnico

Día	Elongación I	Riego (lámina neta en mm)	Lluvia (mm)	Ajuste por humedad en suelo (mm)
2016-06-20	Elongación I			
2016-06-19	Elongación I			
2016-06-18	Elongación I		14.60	
2016-06-17	Elongación I		41.60	
2016-06-16	Elongación I		1.20	
2016-06-15	Elongación I		46.60	
2016-06-14	Elongación I		0.20	
2016-06-13	Elongación I		29.60	
2016-06-12	Elongación I		3.00	

Actualización diaria de eventos:
Riego/Lluvia/Ajuste por humedad

Figura 4.22. Despliegue de edición por lote del componente riego, lluvia y ajuste de humedad. SC.

Para el **Despliegue grafico de resultados** sobre el Balance Hídrico (BH-CENGI-MT). En **consulta** se podrá observar en el icono **reportes gráficos** en el cual se podrá desplegar dos tipos de gráficas y un Tabla resumen, los cuales son los siguientes:

1. **Grafica BH-CENGI-MT tecnología actual**, en el cual se simula la acción del comportamiento del abatimiento en el tiempo de la humedad en el suelo, basado en lo que planificó el técnico referente a la frecuencia, tiempo y lámina de riego, tal como se observa en la Figura 4.23. El despliegue es por lote a través de una gráfica que integra los parámetros de riego del lote (Capacidad de campo, Punto de marchitez permanente y déficit permitido de manejo), en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar, se analiza y se estima el abatimiento de la humedad en el suelo tomando como base el comportamiento de la ETo y lluvia día con día (variables determinantes).

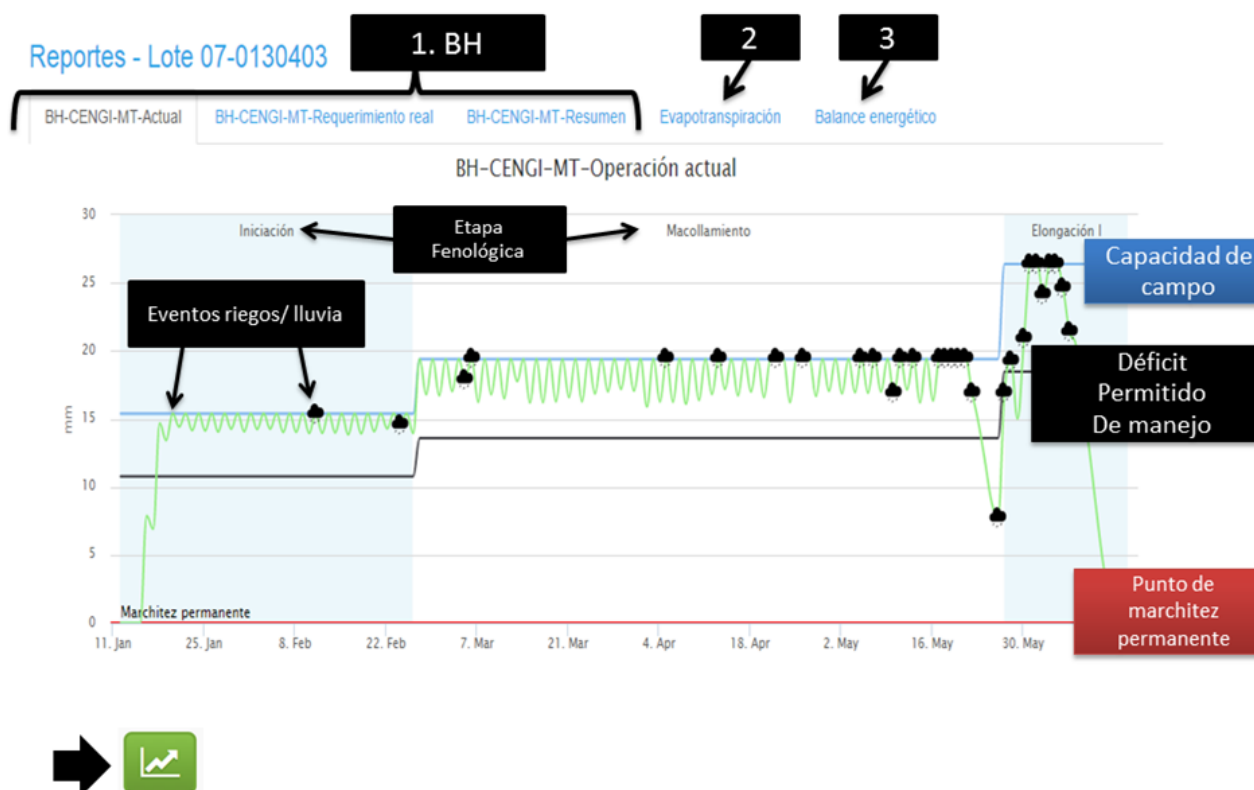


Figura 4.23. Despliegue de gráficos de resultados del Balance Hídrico (BH-CENGI-MT) de la tecnología actual. SC, 2016.

2. **Grafica BH-CENGI-MT requerimiento real**, a diferencia de la anterior gráfica, este simula la acción de abatimiento en tiempo real basado en el comportamiento de la ETo y lluvia, lo que genera frecuencias, tiempos y láminas de riego diferentes en cada una de las etapas fenológicas, como se observa en la Figura 4.24. Se despliega por lote a través de una gráfica que integra los parámetros de riego (Capacidad de campo, Punto de marchitez permanente y déficit permitido de manejo), en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar.

Reportes - Lote 07-0130403



Compuservice Webdesigns © 2016

Figura 4.24. Despliegue de gráficos de resultados del Balance Hídrico (BH-CENGI-MT) del requerimiento real. SC, 2016.

3. **Tabla resumen BH-CENGI-MT**, genera una comparación del balance hídrico con la tecnología actual y requerimiento real sobre la lámina neta aplicada por riego, déficit/exceso de agua, frecuencia y número de riegos por etapa fenológica (Ver Tabla 4.6).

Tabla 4.6. Despliegue de Tabla resumen BH-CENGI-MT, que genera una comparación del balance hídrico con la tecnología actual y requerimiento real. SC, 2016.

Reportes - Lote 07-0130403

BH-CENGI-MT-Actual BH-CENGI-MT-Requerimiento real BH-CE Evapotranspiración Balance energético

1 BH-CENGI-MT-Operación actual

Etapas fenológicas	LN/riego	LN Total	Déficit (mm)	Frecuencia (días)	# Riegos
Iniciación	9	189	-49.86	2.14	21
Macollamiento	9	387	-12.21	2.09	43
			-107.87		
Total	18	576	-169.94	1.41	64

2 BH-CENGI-MT-Operación requerimiento real

Etapas fenológicas	LN/riego	LN Total	Déficit (mm)	Frecuencia (días)	# Riegos
Iniciación	4.62	55.44		3.75	12
Macollamiento	5.82	168.78		3.1	29
Elongación I	7.91	23.73		38.33	3
Total	18.35	247.95	0	15.06	44

328 mm
diferencial

Compuservice Webdesigns © 2016

Para el **despliegue gráfico de resultados de evapotranspiración y radiación global**, en **reporte gráfico** se podrá observar para cada una de las etapas fenológicas el comportamiento de la evapotranspiración de un cultivo de referencia estimada por Penman- Monteith (ET_o) y comportamiento normal de la radiación global entre el límite superior e inferior en cada una de las etapas fenológicas, variable base para profundizar en el análisis del balance energético, tal como se presenta en el ejemplo de las Figuras 4.25 y 4.26.

Reportes - Lote 07-0130403

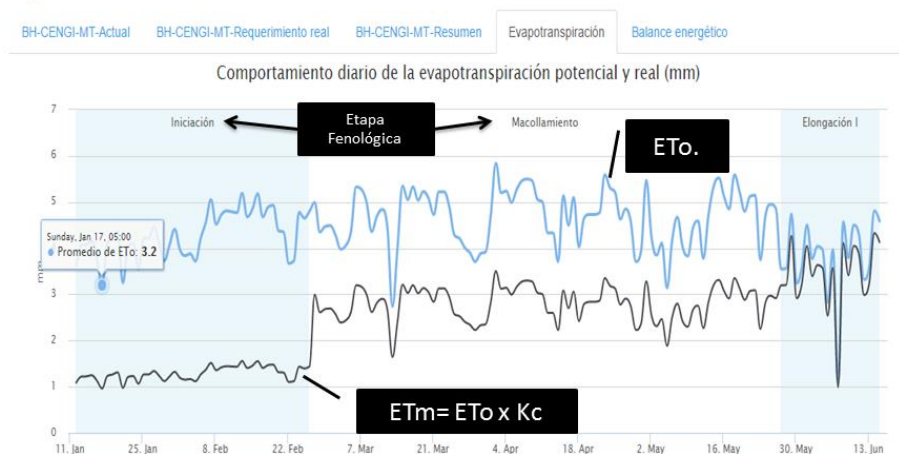


Figura 4.25 Despliegue gráfico de resultados de la evapotranspiración de un cultivo de referencia estimada por Penman Monteith (ET_o) y la Evapotranspiración máxima del cultivo (ET_m) en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar. SC, 2016.

Reportes - Lote 07-0130403

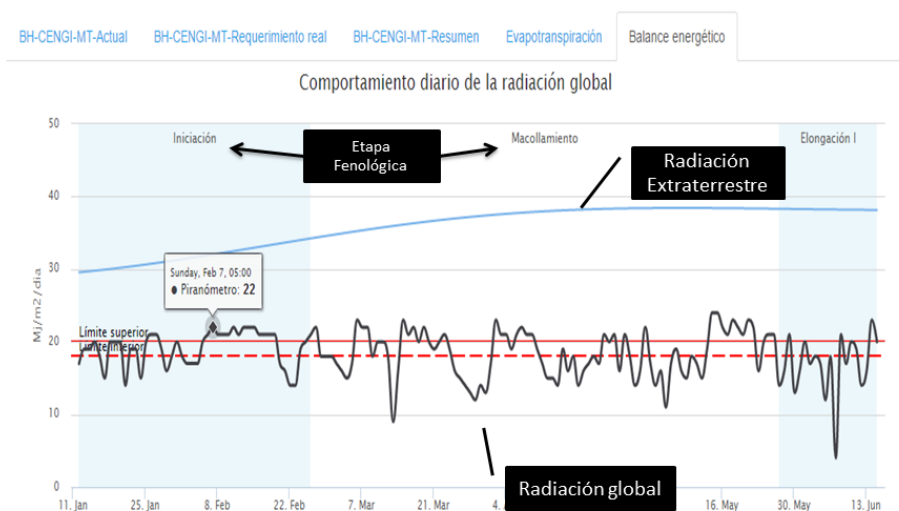


Figura 4.26. Despliegue gráfico de resultados de la radiación global en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar. SC, 2016

En el caso de **Consulta seguimiento de la humedad en el suelo**, en el icono de consulta también se podrá dar seguimiento a la humedad en el suelo, al introducirse al icono *seguimiento de humedad*, ya sea por lote o equipo. Si el seguimiento de la humedad se realiza por equipo de riego, aparecerán todos los lotes que riega el sistema. Para el seguimiento en tiempo real será importante colocar la fecha del día anterior. La condición de humedad entre CC y PMP será indicada en colores, si es: Azul, la humedad está cerca de CC y se considerará óptima; verde, cuando la humedad todavía está en una condición muy buena (a la mitad entre CC y déficit permitido de manejo o umbral de riego); anaranjado, la condición de humedad es regular (humedad cercana al déficit permitido de manejo o umbral de riego) y si es roja, la condición de la humedad es baja (humedad debajo de la del déficit permitido de manejo o umbral de riego). Un ejemplo de despliegue se puede observar en la Figura 4.27. En cada Tabla que representa un lote, al pinchar el mismo, se podrá visualizar las gráficas de BH-CENGI-MT, ETo y radiación global. Para una mejor comprensión de la condición de humedad en la Figura 4.28, se proporciona una interpretación técnica de lo que significa cada una de las condiciones de humedad en el suelo, estimada a través del BH-CENGI-MT.



Figura 4.27 Despliegue del informe sobre la condición de humedad por lote que cubre el equipo de riego en el SC, 2016.

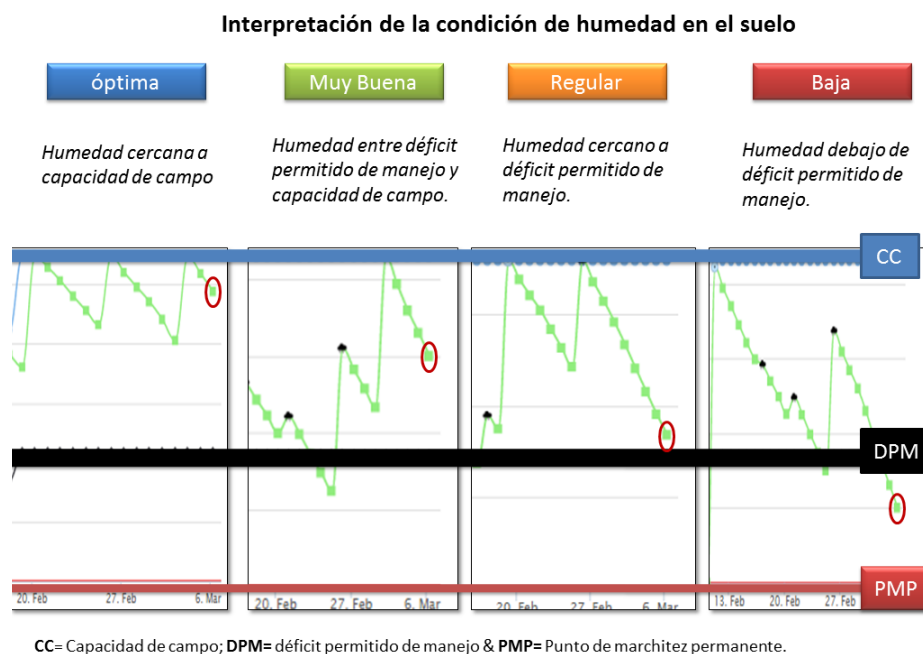


Figura 4.28. Gráfico de ¿Cómo? interpretar la condición de la humedad en el suelo estimada por BH-CENGI-MT. SC, 2016.

También existe una **Consulta de propuesta de planificación del riego** a través de la **consulta**, aparece la propuesta de un plan de riego, basado en la relación agua-suelo-caña de azúcar-atmósfera-operación. El plan se puede conocer al introducirse al icono **planificación de riego**. La planificación se propone por lote según fecha de siembra o corte. En la Figura 4.29 se presenta un ejemplo de despliegue del plan de riegos donde se destaca los días para riego (según la historia de días en déficit según estación meteorológica, estrato y fecha de corte, así como también, LARA o Ln, ETo al 75 % de probabilidades, la ETm, frecuencia de riegos y número de riegos, así mismo, la lámina total a utilizar.

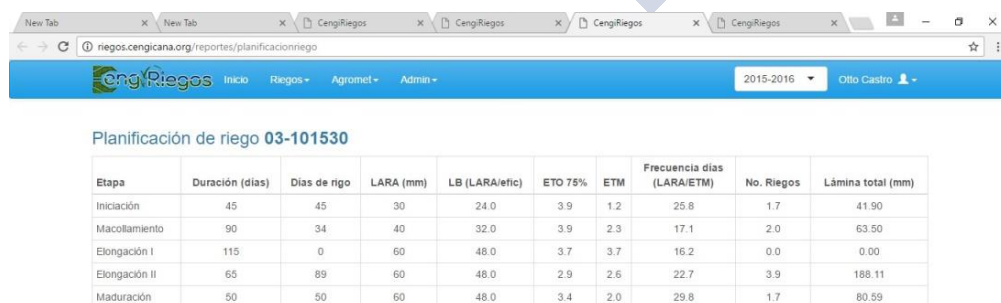


Figura 4.29. Despliegue de un plan de riego por lote propuesta que se realiza con base a la relación agua-suelo-caña de azúcar-atmósfera-operación. SC, 2016.

4.3.3.3. Módulo de agrometeorología

El módulo de agrometeorología describe las condiciones climáticas en las cuales se desarrolla la caña de azúcar, acción que puede realizarse por región, finca, equipo de riego o lote para cada una de las etapas fenológicas, según fecha de siembra o corte. En la Figura 4.30 se despliega un ejemplo del análisis agrometeorológico, donde se cuantifica la velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, lluvia, radiación global, radiación neta y la ETo Penman-Monteith según etapa fenológica.

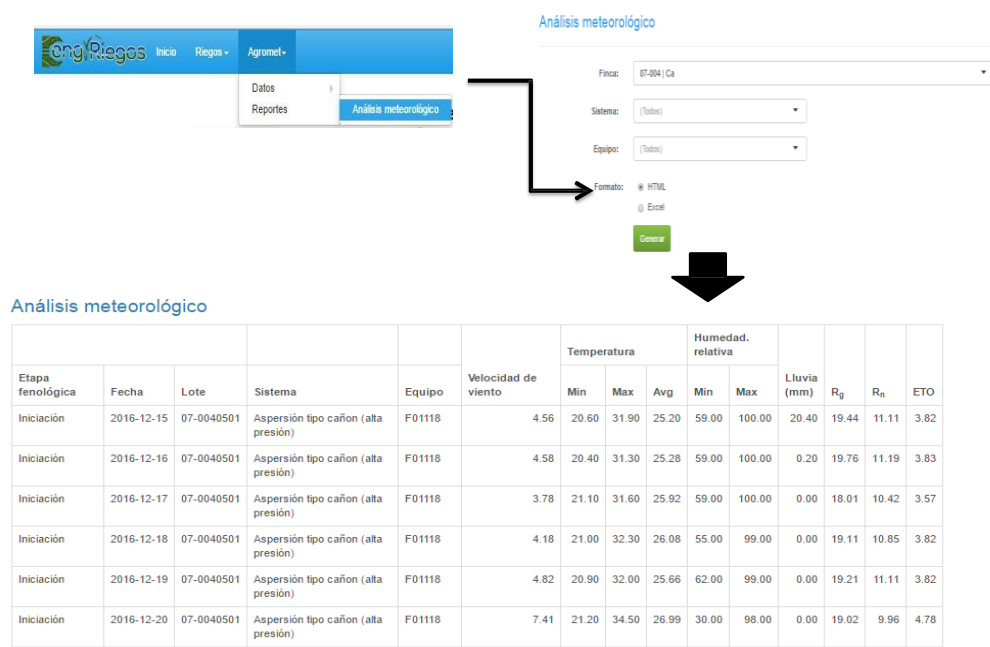


Figura 4.30. Despliegue de análisis agrometeorológico que se realiza durante todo el ciclo de cultivo de la caña de azúcar. SC, 2016.

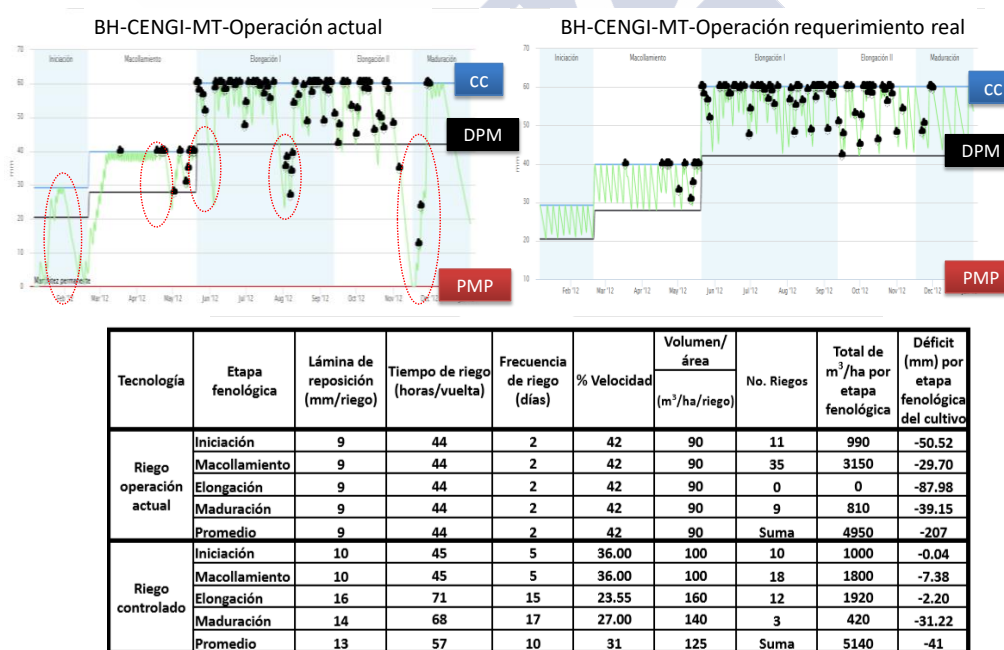
4.3.4. Documentación de la aplicación del SC

4.3.4.1. Estudio del déficit hídrico con balance hídrico (Análisis retrospectivo)

El período de cultivo 2012, fue especial, considerando que el período de lluvia atmosférica (mayo a octubre) fue irregular, causando períodos de déficit hídrico, este, a su vez provocaría una merma en la producción de azúcar entre 15 a 20 TCH. Ante tal hecho, se realizó un análisis retrospectivo de ese período de cultivo, los resultados son los que se indican en la Figura 4.31, se determinó con Balance Hídrico (**BH-CENGI-MT**) que en la etapa de elongación (más sensible al déficit hídrico) de ese período incidieron tres períodos de déficit hídrico originadas por irregularidades de la lluvia, lo que hubiera significado el haber

aplicado 12 riegos, para el caso del área que ocupa el sistema de pivote central fijo ubicado en la finca el Retiro lo que hubiera significado los riegos oportunos para la etapa de elongación. Los riegos oportunos se caracterizan porque se tienen que aplicar el riego en los períodos de mayor significancia en los efectos en la producción, como lo es la etapa de elongación, los riegos oportunos se aplican con frecuencia, láminas y tiempos variables.

También en la Figura 4.31, se observa que en todo el período de cultivo con la operación actual o tradicional el número total de riegos fue de 55, riegos que se aplicaron únicamente en las etapas de iniciación(11 riegos), macollamiento (35 riegos) y maduración (9 riegos) con un gasto de 4,950 m³/ha, no así en la etapa de elongación; mientras que aplicando el Balance Hídrico para todo el ciclo, el sistema de riego pivote central fijo tuvo que haber aplicado un total de 43 riegos que consideró todas las etapas, con un gasto de 5,140 m³/ha, de este total, en la etapa de elongación se utilizaron 1,920 m³/ha. Otro de los aspectos importantes que se observan es la reducción de riegos en la etapa de macollamiento, en esta etapa con la operación actual se aplicaron 35 riegos, mientras que en la operación controlada tuvieron que haberse aplicado solo 18 riegos, los 17 riegos menos hubiera significado un ahorro de agua de 1,350 m³/ha.



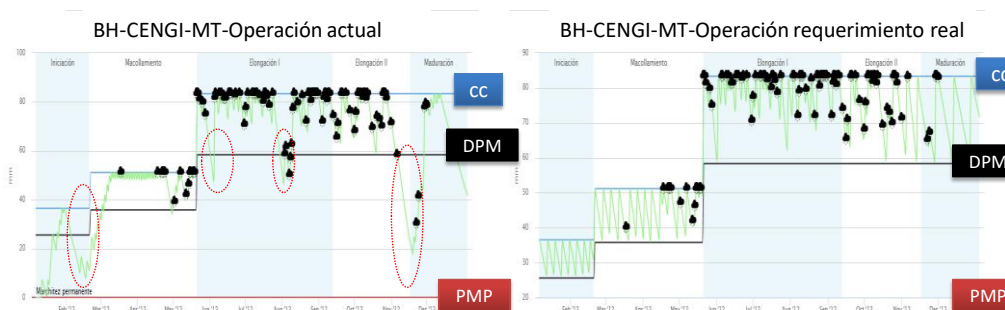
Análisis gráfico comparativo de la operación actual y controlada (simulado) del riego con pivote central móvil, temporada 2012/13 en condiciones de suelos **con veta arenosa** de la finca El Retiro, Madre Tierra

Memoria Presentación de Resultados de Investigación. Zafra 2012-13. CENGI CAÑA. Guatemala. Pp. 306-317.

Nota: CC=Capacidad de campo; DPM=déficit permitido de manejo; PMP=Punto de marchitez permanente

Figura 4.31. Análisis gráfico comparativo del balance hídrico (BH-CENGI-MT) de la operación actual y controlada con pivote central móvil, temporada 2,012/2,013 en condiciones de un suelo con veta arenosa de la finca “El Retiro, Ingenio Madre Tierra. (Figura elaborada con el SC).

En otros de los casos, en la Figura 4.32, se presenta un análisis retrospectivo de las condiciones hídricas en que estuvo el período de cultivo 2,012 pero en un suelo sin vetas de arena, que tienen una mayor capacidad de retención de humedad, en este tipo de suelos, se tuvieron que haber aplicado 6 riegos en la etapa de elongación con un gasto de 4,180 m³/ha; de este total, en la etapa de elongación según el balance hídrico se debió utilizar 1,380 m³/ha. Mientras que en la etapa de macollamiento se tuvieron que haberse aplicado solo 14 riegos, 21 riegos menos que lo que se aplica tradicionalmente, lo que significaría un ahorro de agua de 1,470 m³/ha.



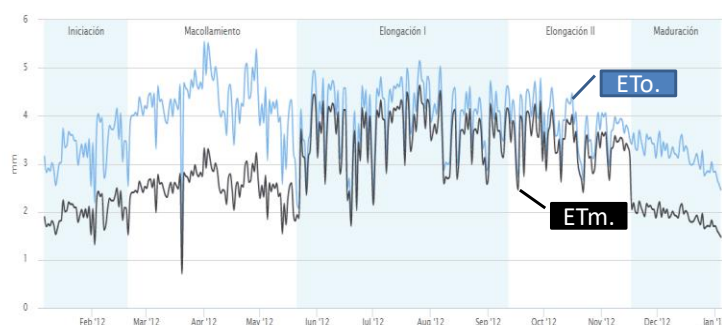
Tecnología	Etapas fenológicas	Lámina de reposición (mm/riego)	Tiempo de riego (horas/vuelta)	Frecuencia de riego (días)	% Velocidad	Volumen/área (m ³ /ha/riego)	No. Riegos	Total de m ³ /ha por etapa fenológica del cultivo	Déficit (mm) por etapa fenológica del cultivo
Riego operación actual	Iniciación	9	44	2	42	90	11	990	-66.09
	Macollamiento	9	44	2	42	90	35	3150	-34.30
	Elongación	9	44	2	42	90	0	0	-58.83
	Maduración	9	44	2	42	90	9	810	-34.70
	Promedio	9	44	2	42	90	Suma	4950	-194
Riego controlado	Iniciación	12	53	5	31.26	120	9	1080	0.00
	Macollamiento	12	53	6	31.26	120	14	1680	-7.71
	Elongación	23	102	30	16.31	230	6	1380	-7.18
	Maduración	20	88	25	18.83	20	2	40	-18.45
	Promedio	17	74	16	24	123	Suma	4180	-33

Análisis gráfico comparativo de la operación actual y controlada (simulado) del riego con pivote central móvil, temporada 2012/13 en condiciones de suelos **sin veta arenosa** de la finca El Retiro, Madre Tierra.

Memoria Presentación de Resultados de Investigación. Zafra 2012-13. CENGICAÑA, Guatemala. Pp. 306-317.

Figura 4.32. Análisis gráfico comparativo del balance hídrico (BH-CENGI-MT) de la operación actual y controlada con pivote central móvil, temporada 2,012/13 en condiciones de un suelo sin veta arenosa de la finca “El Retiro, Ingenio Madre Tierra. (Figura elaborada con el SC, 2016).

Con SC, también se puede analizar el comportamiento de la demanda climática, a través del conocimiento de la ETo en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar según época de corte o siembra, tal como se presenta el ejemplo de la Figura 4.33. Se observa que en la época, las mayores demandas de agua se presentan en la etapa de macollamiento, aunque el consumo de agua requerido para esta etapa es menor en relación a las etapas de elongación I y II.



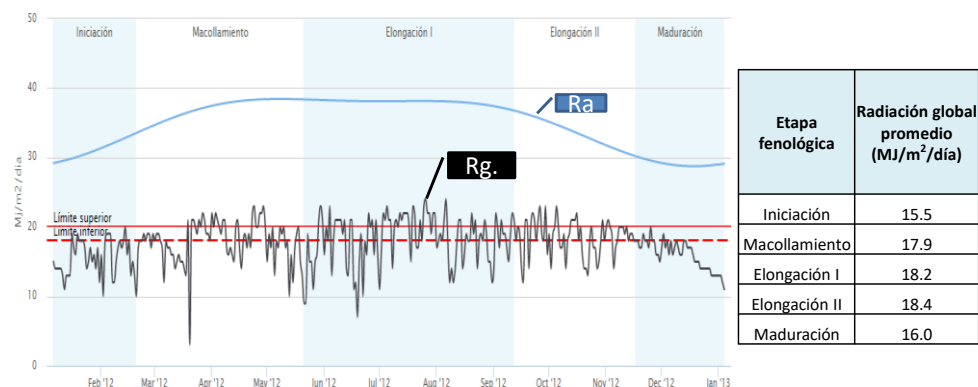
Etapas fenológicas	Promedio de ETO (mm/día)	Promedio de ETM (mm/día)	Máx. de ETO (mm/día)	Máx. de ETM (mm/día)
Iniciación	3.3	2.0	4.2	2.5
Macollamiento	4.2	2.5	5.6	3.3
Elongación I	4.0	3.6	5.2	4.6
Elongación II	3.8	3.4	4.8	4.3
Maduración	3.2	1.9	3.7	2.2

Documentado en memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2012/13. Cengicaña, Guatemala Pgs: 306-317.

Figura 4.33. Comportamiento de la demanda climática (ETo) y demanda de agua del cultivo ETm ($ETo \cdot Kc$) temporada 2,012/13 en condiciones de la finca “El Retiro, Ingenio Madre Tierra. (Figura elaborada con el SC, 2016).

El SC analiza el comportamiento de la radiación global (R_g) en cada una de las etapas fenológicas, base para estudiar el balance energético y su efecto en caña de azúcar. En estudios agrometeorológicos realizados en el área de riegos de Cengicaña se ha establecido que valores entre 18 a 20 $MJ/m^2/día$ (valores normales de energía) y arriba de 20 $MJ/m^2/día$ (valores altos de energía) en la etapa de elongación, han representado para la industria azucarera guatemalteca los mejores años productivos, con estos valores de energía no debe existir déficit hídrico en esa etapa para lograr buenas producciones.

En el caso del estudio realizado en finca “El Retiro”, indica que en el período de cultivo 2,012, la radiación global promedio en las etapas de elongación I y II de esa fecha de siembra o corte, estuvieron en condiciones normales de energía (Ver Figura 4.34). Este comportamiento energético normal implicó que las condiciones hídricas debieron ser óptimas, caso contrario, se puede indicar, que la mayor causa en la merma haya sido el déficit hídrico, tal como se mostró en las Figuras 4.31 y 4.32. El comportamiento de la energía puede relacionarse también con índices de crecimiento e índices hídricos.



Documentado en memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2012/13. Cengicaña, Guatemala Pgs: 306-317.

Figura 4.34. El comportamiento de la radiación global promedio (MJ/m²/día) en condiciones de la finca “El Retiro”, Ingenio Madre Tierra. (Figura elaborada con el SC, 2016).

4.3.4.2. Planificación y ajuste de frecuencias, tiempos y láminas en los diferentes sistemas de riego.

Una de las aplicaciones importantes que se han realizado con BH-CENGI-MT ha sido el de ajustar frecuencias con base a los resultados del Balance Hídrico. En el caso de la finca Cantaira, MT, se realizó un ajuste de frecuencias en el pivote Central Fijo: De 2 días continuos sin descanso del equipo, se ajustó a una frecuencia de 6 días, con cuatro días en operación y dos días de descanso o mantenimiento. Este ajuste con balance hídrico (Figura 4.35A) permitió aplicar en la etapa de macollamiento 198 mm (11 riegos de 18 mm con una frecuencia de 6 días), mientras con la tecnología tradicional (Figura 4.35 B) se aplicó 342 mm (38 riegos de 9 mm con frecuencia de 2 días), lo que permitió ahorrar en esta etapa 144 mm equivalente a 1,440 m³/ha.

La aplicación del balance hídrico conlleva un control del abatimiento de la humedad en todo el ciclo y detecta los períodos de déficit hídrico que se van produciendo en todo su ciclo, tal es el caso, de lo que sucedió para la etapa de elongación I, en donde se aplicaron 5 riegos de 18 mm cada uno, lo que significaron los riegos oportunos, justificados por las irregularidades de la lluvia en esa etapa importante de crecimiento, y de la misma manera la aplicación de 3 riegos en la etapa de maduración para el mantenimiento de humedad previo a la cosecha (indicación en círculos rojos figura 4.35 A). En este caso, la aplicación del balance hídrico no generó ahorro de agua y energía, si no la aplicación del riego en el momento oportuno.

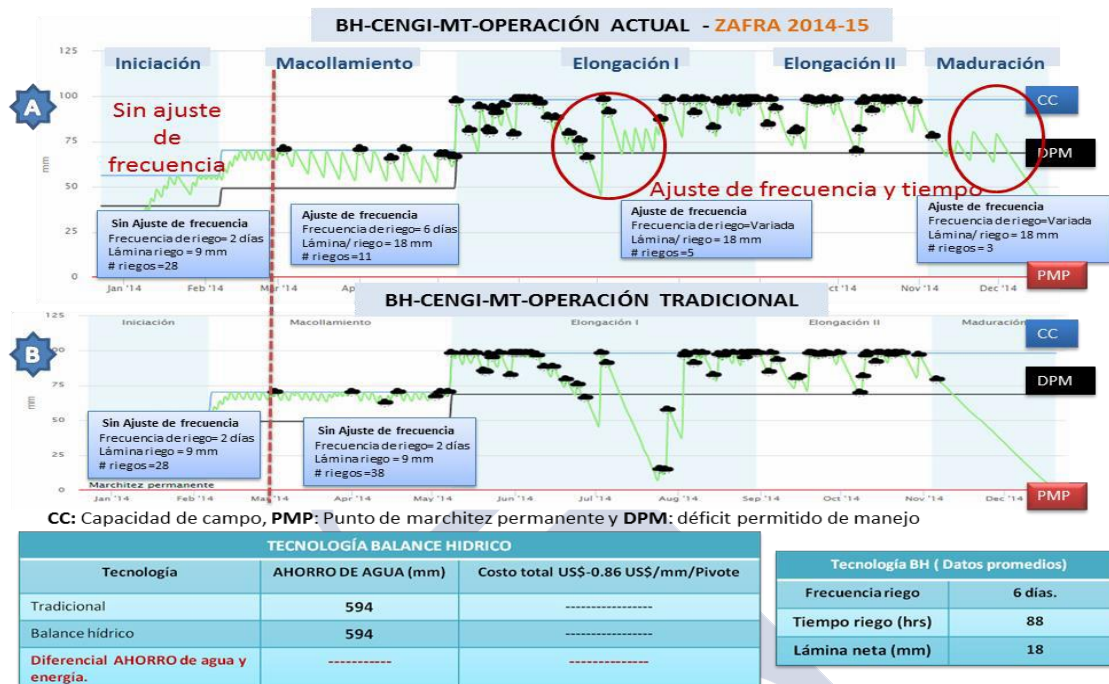


Figura 4.35. (A) Manejo de frecuencia con balance hídrico (B) Sin manejo de frecuencia. Pivote Central Fijo de finca Cantoira, estrato litoral del ingenio Madre Tierra. SC, 2016

El seguimiento con balance hídrico, permitió aplicar riegos oportunos, que generó incremento en 35 toneladas de caña por hectáreas (TCH) en comparación a lo obtenido en los últimos tres años donde no se utilizó el balance hídrico en el sistema de pivote central fijo. Las razones se explican de la siguiente manera: Al aplicar el riego en las etapas críticas como la elongación I, en este caso, la aplicación de 5 riegos de 18 mm/riego durante el período julio y agosto (período de canícula), minimizó los efectos del déficit hídrico, tal como se muestra en la Figura 4.36.

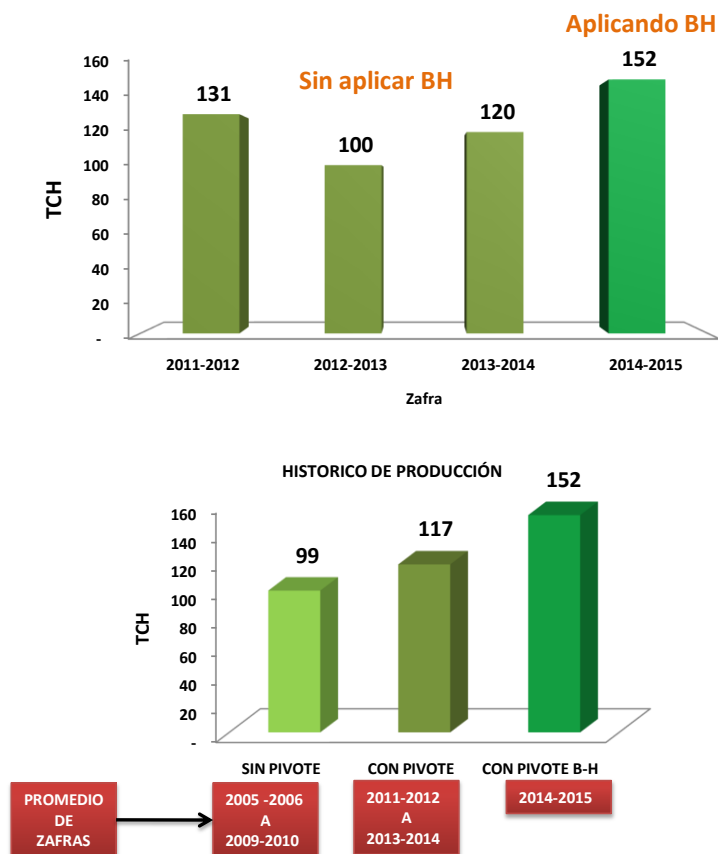
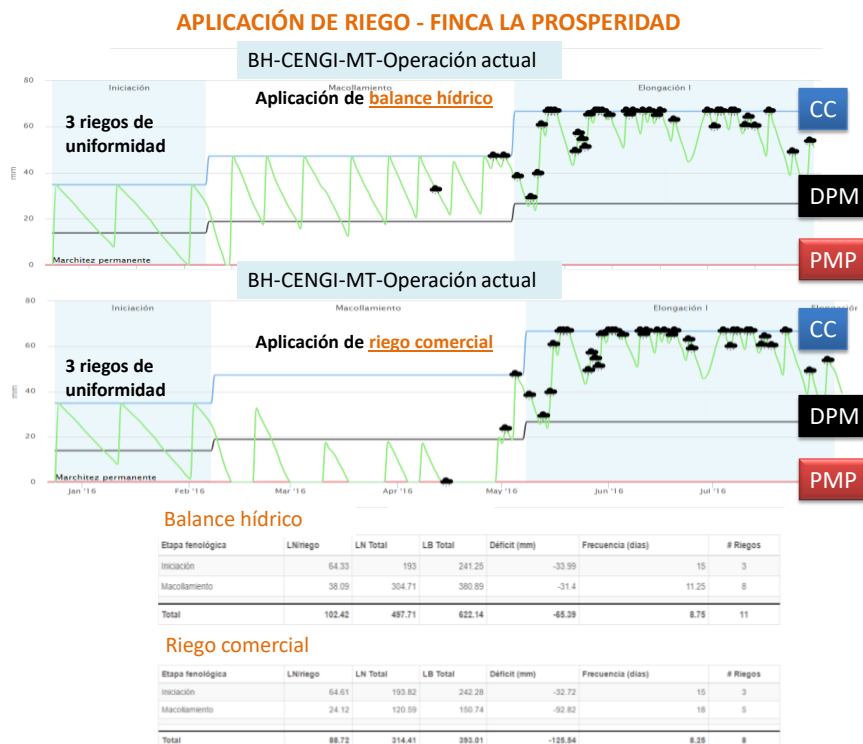


Figura 4.36. Toneladas de caña por hectárea (TCH) obtenidas cuando se realizaron ajustes en la frecuencia de riego con balance hídrico. Pivote Central Fijo de finca Cantoira, estrato litoral del ingenio Madre Tierra.

4.3.4.3. Manejo del balance hídrico en tratamientos a nivel experimental

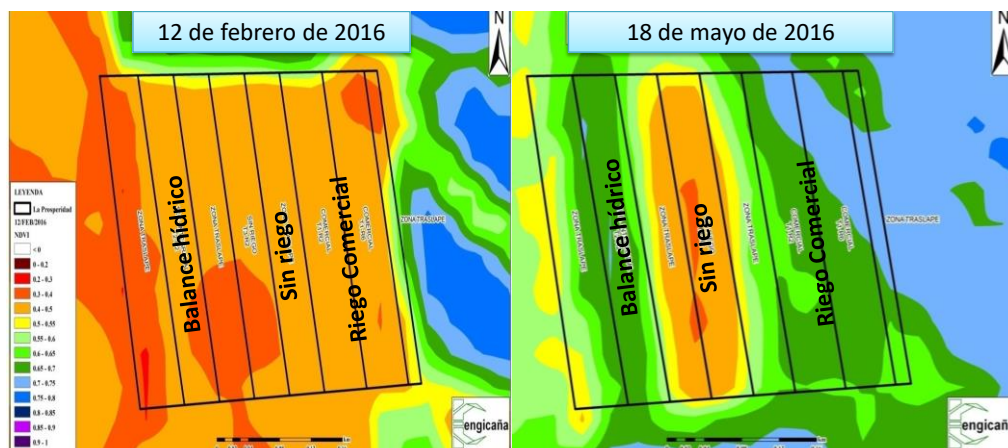
Uno de los usos adicionales que se le ha dado al SC, es que ha servido como una herramienta para manejar el balance hídrico en los tratamientos a nivel experimental. Tal es el caso, de su aplicación en estudios sobre la eficiencia en la operación actual de sistemas de riego, versus la eficiencia en la operación con una integración de tecnologías acordes a las condiciones de suelo, marco de riego, tipo de aspersores, etc. Los resultados del uso del SC tal como se muestra en la Figura 4.37.



Nota: Se necesitan 9 TCH más para pagar los tres riegos adicionales por uso de la tecnología integrada, fuente ingenio Santa Ana, 2016.

Figura 4.37. Aplicaciones del Balance Hídrico en ensayos de riegos: El riego comercial versus tecnología integrada que incluye el uso del Balance Hídrico en el periodo de enero a mayo 2016, finca “La Prosperidad”, ingenio Santa Ana. (Figura elaborada con el SC)

La respuesta técnica de la caña de azúcar en los tratamientos con aplicación del balance hídrico, se puede visualizar a través de imágenes satelitales como el Landsat 8-NDVI, en la Figura 4.38 se muestra un ejemplo de respuesta en dos periodos diferentes, uno tomado el 12 de febrero, que marca el inicio de tratamientos y el otro, el del 18 de mayo, donde se visualiza los efectos de la aplicación del riego en cada uno de los tratamientos y de lo que se espera de manejar el riego con balance hídrico.



Fuente: *Departamento de ingeniería agrícola, Santa Ana.*

Figura 4.38. Imagen satelital Landsat 8-NDVI, del ensayo ubicado en la finca “La Prosperidad”, ingenio Santa Ana en el período de enero a mayo del 2016.

Otros de los usos del balance hídrico en el manejo de tratamientos, es la respuesta hídrica en el manejo de frecuencias, tiempos y láminas fijas, tal como se observa en la Figura 4.39, donde se establece que manejar el riego con frecuencias de nueve días (BH-CENGI-MT-Operación actual) se ajusta a las exigencias establecidas utilizando balance hídrico (BH-CENGI-MT-Operación requerimiento real) y esta comparación permitirá validar o ajustar las frecuencias según el resultado obtenido en el balance hídrico.

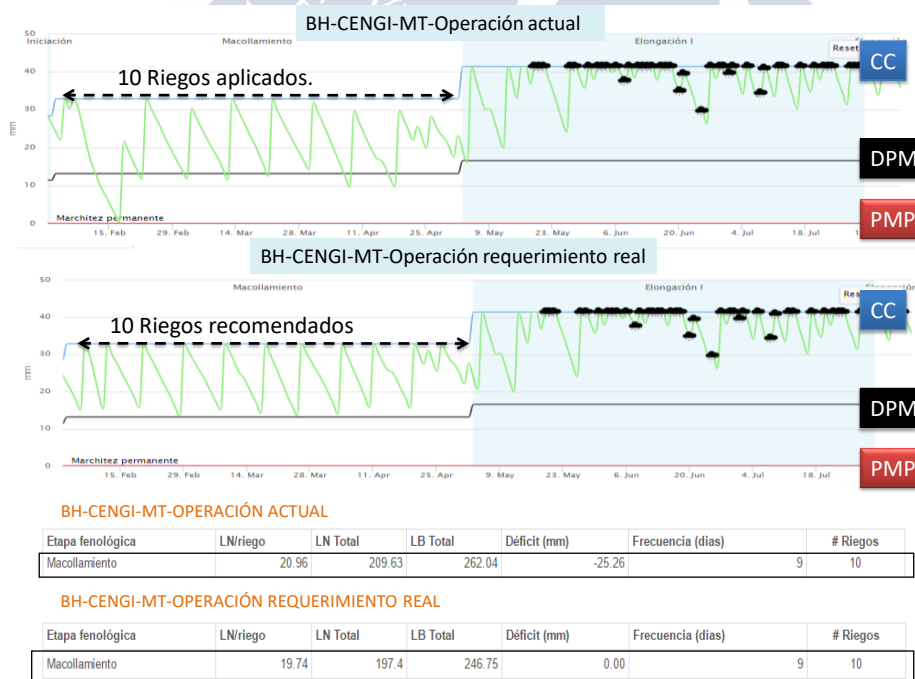


Figura 4.39. Seguimiento de tratamientos en ensayos de riego aplicando balance hídrico en condiciones de suelo arenoso de la finca “Santa Cristina”, ingenio Magdalena. (Figura elaborada con el SCV1).

4.3.5. Impacto del uso del balance hídrico en la economía y sostenibilidad del recurso hídrico

Se estima que con el uso del balance hídrico como una herramienta para la optimización del uso del agua, utilizándolo en la planificación en los mecanizados, la industria podría ahorrar 10,062 ML/año en un área potencial de 38,000 has, el cual generará un impacto económico de un millón de US\$/año. Mientras que su uso en la ejecución se podría ahorrar 2,280 ML/año con un impacto económico de 0.23 millones de US\$/año, como se observa en la Figura 4.40. Ahora si el balance hídrico se utiliza integrado con otras tecnologías como, la mejora de los suelos para incrementar la capacidad de retención de agua, la industria podría ahorrar 13,543 ML/año y un impacto económico de 1.35 millones de US\$/año.

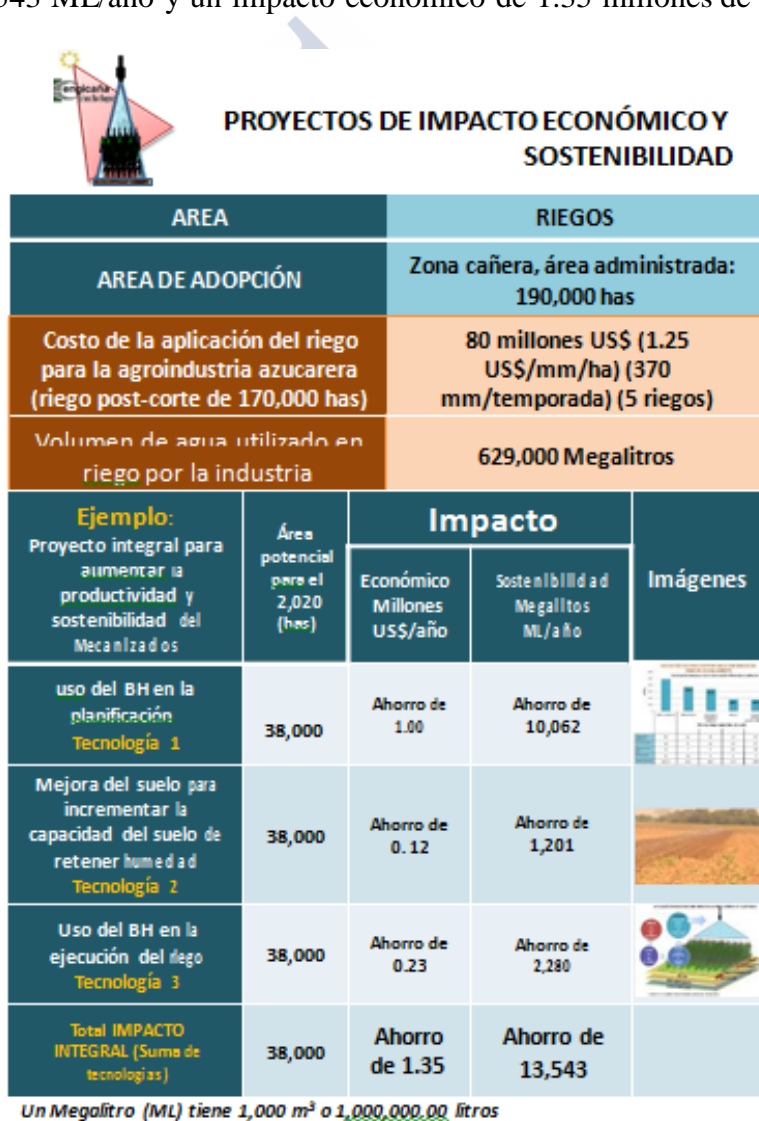


Figura 4.40. Impacto económico y sostenibilidad por el uso del balance hídrico en sistemas mecanizados (pivotes y frontales) en áreas de textura franco arenosa en la industria azucarera guatemalteca.

4.3.6. Estrategias técnicas utilizadas para divulgar, manejar, lograr la adopción y capacitación del SC

4.3.6.1. Divulgación del SC

Se utilizó como primera estrategia preparar una presentación en PowerPoint en donde se expuso todo el paquete que representa SC, los temas abordados son los siguientes (ver presentación en anexo III)

- ¿Cómo inició Cengirriegos?
- ¿Qué es y cómo opera Cengirriegos?
- Información requerida
- Bondades
- Qué debilidades se deben de convertir en fortalezas en la operación del riego
- Esquema de operación
- Importancia del balance hídrico
 - Funcionamiento de alarma en el Balance hídrico
 - Características de Cengirriegos
 - Manejo de la información para usuarios
 - Manejo administrativo
- Estrategias para el manejo de Cengirriegos

Cómo segunda estrategia, se realizaron dos tipos de presentaciones: Una, presentaciones previas al lanzamiento oficial y la otra, presentaciones de lanzamiento.

Las presentaciones previas al lanzamiento oficial del Software fueron un total de ocho a los ingenios interesados con el fin de revisar, detectar y ajustar algunos de los procedimientos técnicos referentes a la obtención del producto de cada uno de los tres módulos. Luego de los ajustes al Software, se realizaron cinco presentaciones de lanzamiento, principalmente, a los organismos directrices de Cengicaña, con el fin de recibir su aval para la utilización, el cual fue positivo (Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Presentación del Software “Cengiriegos” a diferentes ingenios azucareros de la zona cañera guatemalteca.

<i>Presentación del Software “Cengiriegos”</i>			
No.	FECHA	ENTIDAD	OBSERVACIONES
Presentaciones previas al lanzamiento oficial			
1	10 may 16	Departamento de ingeniería agrícola del Ingenio Pantaleón	Presentación y revisión del Software “Cengiriegos” previo a su lanzamiento
2	16 may 16	Departamento de ingeniería agrícola del Ingenio Santa Ana	Presentación y revisión del Software “Cengiriegos”
3	17 may 16	Departamento de ingeniería agrícola del Ingenio Madre Tierra	Presentación y revisión del Software “Cengiriegos” previo a su lanzamiento
4	26 may 16	Departamento de ingeniería agrícola del Ingenio Pantaleón	Capacitación uso del Software “Cengiriegos”
5	7 jun 16	Equipo de Producción Agrícola del Ingenio Madre Tierra (EPA)	Presentación Software “Cengiriegos”
6	8 jun 16	Comité de Riegos (Entidad que aglutina a todos los especialistas de ingeniería agrícola de los ingenios Azucareros asociados a Cengicaña)	Presentación Software “Cengiriegos”
7	9 jun 16	Departamento de ingeniería agrícola del Ingenio Santa Ana	Capacitación uso del Software “Cengiriegos”
8	17 jun 16	Departamento de investigación ingenio Magdalena	Presentación Software “Cengiriegos”
Presentaciones de lanzamiento			
1	22 jun 16	Comité Técnico Agrícola (CTA) Entidad que aglutina a todos los	Presentación Software “Cengiriegos”

4.3.6.2. Manejo técnico y efecto multiplicador esperado del SC

El manejo técnico de SC fue avalado por el comité de riegos y comité técnico agrícola, constituye la parte más importante, debido al manejo de mucha información técnica y ante todo, el mantenimiento de la calidad de la información. En estas circunstancias, el gerente agrícola o el jefe de ingeniería agrícola de cada ingenio deberá asignar un administrador del Software o en su mayor dimensión un administrador por zona o región, así mismo, sus auxiliares/zona, el rol del administrador (ver Figura 4.41) será el siguiente:

Recibir diariamente la información solicitada, de cada una de las fincas del ingenio. Durante el período de riegos o zafra, con base a la información recibida, él emitirá reportes de todos los lotes para verificar in situ la humedad en el suelo, con el fin de realizar ajustes.

Durante el período de no zafra, también emitirá reportes de todos los lotes para verificar in situ la humedad en el suelo, con el fin de realizar ajustes, principalmente, en los períodos de canícula (julio-agosto), o en los años en que el período de lluvia de junio a octubre es muy irregular. Durante el período de zafra y no zafra, el administrador deberá analizar e interpretar la información del período por equipo de riego, la mejor alternativa es bajar la información a Excel y manejar la información a través de tablas dinámicas. Será responsable de entregar los resultados obtenidos a los medios correspondientes. Los informes de resultados estarán dirigidos a obtener información referente: Al ahorro de agua y energía a través del Balance hídrico, cantidad de energía disponible en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar con fines de estimación de cosecha y cantidad de agua consumida en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar.

Entre otros, análisis de variables meteorológicas como velocidad del viento, humedad relativa, temperatura; eficiencia del sistema según variables meteorológicas, etc.



Figura 4.41. Esquema de estrategias del Manejo técnico de SC y el desarrollo del efecto multiplicador en la zona cañera guatemalteca.





V. CONCLUSIONES

El uso de la metodología del balance hídrico, con la implementación de un software específico, constituye un importante elemento de apoyo en la zona cañera de Guatemala de cara a un uso más eficaz de la irrigación.

La existencia de una base de datos georeferenciados por cada lote de toda la industria azucarera de Guatemala, que cubre más de 200,000 has, consistente en: la red de estaciones meteorológicas automatizadas, la red de pluviómetros administrados por los ingenios, la base de datos de parámetros de riego según textura y los resultados de investigación experimental generados por Cengicaña sobre la respuesta de la caña a la aplicación del agua facilitó la elaboración del Software para aplicar el balance hídrico basado en las características propias de la industria azucarera guatemalteca.

I) Índices de calidad del riego

1. La evaluación de los índices de calidad del riego: uniformidad y eficiencia, registrados en campo (Tarjuelo, 1999) y en pivote DEPIVOT (VALÍN, 2006), permiten mejoras en los sistemas de riego.

Las mejoras atañen: al desempeño de los aspersores (tipo rotación, tamaño de boquillas), a la presión del sistema, al flujo de agua, al estado de la tubería (empaques, fugas, longitud, etc.) e intensidad de aplicación

2. Los coeficientes de uniformidad medidos en el campo (Tarjuelo, 1999) y calculados con el programa DEPIVOT (Valin, 2006) fluctúan entre 81.5 a 92.5 %, lo que garantiza que la aplicación del balance hídrico será factible y exitosa

II) Factores atmosféricos que inciden en ETo

3. Con la tecnología actual se riega 5 mm/día de lámina neta, lo que significa aplicar diariamente 50 m³/ha del período del 15 de noviembre al 15 de mayo de cada año.

Considerando los datos del año en curso la demanda climática (ETo) máxima difiere de la manera siguiente:

- a. noviembre y diciembre: 4.5 mm/día (45 m³/ha)
 - b. enero y febrero: 5 mm/día (50 m³/ha)
 - c. abril: 5.5mm/día (55 m³/ha)
4. Se han caracterizado las demandas hídricas para el periodo ENSO en sus variantes cálido y frío.
 - a. En un período de ENSO cálido y neutro (7 a 8/10 años) se incrementa la demanda climática (ETo) y los requerimientos de agua son mayores a 5 mm/día

debido a una reducción de la lluvia e incremento de la radiación global $> 20 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$ (se necesita riego).

- b. Caso contrario en un período de ENSO frío (2 a 3/10 años), las probabilidades son altas para que existan días con menor radiación (de 12 a $20 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$) y mayor cantidad de lluvia, estos son causa para que los requerimientos de agua sean menores a 4 mm/día (en los años con ENSO frío que se presenten depresiones o tormentas tropicales se necesita drenaje superficial y subterráneo).
- c. En los períodos de diciembre y enero con incidencia de ENSO frío, normalmente se incrementan los frentes fríos provenientes del Norte, estos a su vez, la velocidad del viento con rachas mayores a 10 Km/h (2.8 m/s), lo que incrementa el requerimiento de agua en caña de azúcar con valores mayores a 6 mm/día.

III) Propuestas de mejora de la operación del riego aplicando balance hídrico

- 5. Se documentó, en el ingenio Madre Tierra en el 2015, que al realizar ajustes de frecuencia con balance hídrico (BH-CENGI-MT), no solo permitió ahorrar 144 mm, equivalente a $1,440 \text{ m}^3/\text{ha}$ en la etapa de macollamiento, e incluso incrementó la producción en 35 toneladas de caña por hectáreas (TCH) en comparación a lo obtenido en los últimos tres años, donde no se utilizó el balance hídrico con el mismo sistema de riego.

IV) El Software Cengirriegos para la aplicación del balance hídrico

- 6. La metodología del balance hídrico para caña de azúcar adaptada para Guatemala fue liberada por Cengicaña en el 2006 (memoria de presentación de resultados de investigación de la zafra 2005/2006) como una herramienta importante para la optimización del uso de agua en pivotes fijos para la Finca Monte Alegre del ingenio la Unión.

El Software Cengirriegos, fue diseñado para ser utilizado en toda la zona cañera guatemalteca. Su capacidad de análisis será a nivel de lote y podrá ser utilizado para diferentes estratos altitudinales, tipos de suelos y épocas de corte de la caña de azúcar.

- 7. El software Cengirriegos operará con un modelo integral basado en la relación: agua – suelo – caña de azúcar – clima – operación del sistema de riego
- 8. El Software Cengirriegos ejecuta en su primera versión dos módulos

- a. El módulo Riegos, que ejecuta a la vez, tres submódulos: el Balance Hídrico en el suelo (BH-CENGI-MT); el comportamiento y seguimiento de la Radiación Global y el comportamiento y seguimiento de la demanda climática (ETo). Acciones que se ejecuta por lote (área mínima para el manejo de la producción).
 - b. El módulo Agrometeorología, que ejecuta el submódulo: análisis agrometeorológico por lote.
9. El Software Cengirriegos posee las características siguientes:
- a. Se podrá importar características de caña de azúcar, suelo, clima y operación del sistema a través de una matriz que se puede realizar en Excel, lo que permite importar características en una cantidad lotes al mismo tiempo.
 - c. A través de gráficos que integra parámetros de la relación: Agua, suelo, caña de azúcar, clima y operación; se podrá dar seguimiento a la humedad en el suelo en tiempo real.
 - d. Exporta resultados de seguimiento de humedad en el suelo y clima a Excel, estos datos se podrían analizar en ArGis, generando mapas temáticos de condición de humedad en el suelo.
 - d. El Software Cengirriegos podrá ser editado basado a que los resultados que se generen de las investigaciones específicas por sitio o lote pueden reemplazar la información existente.

V) Usos del Software Cengirriegos enfocados al ahorro de agua y energía.

- 10. Se estima que con el uso del balance hídrico en el suelo en sistemas mecanizados y su integración con otras tecnologías como, la mejora de los suelos para incrementar la capacidad de retención de agua, la industria podría ahorrar 13,543 ML/año y un impacto económico de 1.35 millones de US\$/año.

VI) Estrategias de divulgación en la utilización del Software Cengirriegos.

- 11. La utilización y adopción del Software Cengirriegos en Pivotes Fijos alcanzó en la zafra 2014/15 un total de 2,253.46 ha áreas que representan los ingenios: Pantaleón, Madre Tierra y La Unión. Área que representa el 47 por ciento de los pivotes propios.

12. El manejo técnico de Cengirriegos fue avalado por el comité de riegos (CR) y comité técnico agrícola (CTA). En estas circunstancias, el gerente agrícola o el jefe de ingeniería agrícola de cada ingenio deberá asignar un administrador del Software, así mismo, sus auxiliares/zona, el rol del administrador.

La definición de algunas líneas de investigación futura en este campo

La aplicación del balance hídrico en el suelo, resulta ser una herramienta muy importante en los tiempos en los que estamos viviendo, donde se necesita optimizar el uso del agua, debido no solo a su demanda creciente (uso doméstico, industrial, agrícola, turístico, etc), sino también por su oferta decreciente, a causa del manejo inadecuado de la cuenca hidrográfica, aunado al comportamiento de fenómenos océano-atmosféricos como el ENSO-cálido (Niño) y fenómeno Antropogénico como el calentamiento global. Las líneas de investigación son las siguientes:

- 1) La validación del balance hídrico en el suelo en sistemas de riego por goteo en caña de azúcar.
- 2). Relación del balance hídrico en el suelo y los índices vegetativos con imágenes satelitales analizando el valor NDVI, NDWI y MSI.
- 3) Efectos en la respuesta de la caña de azúcar en riego pre-corte cuando se aplica el balance hídrico en el suelo en un sistema de pivote fijo.
- 4) Cuantificación del aporte capilar en el balance hídrico en suelos del litoral de la zona cañera guatemalteca.
- 5) Efectos en la aplicación del balance hídrico en suelos muy heterogéneos en el riego Post-corte de la caña de azúcar.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alfaro, J. L. et. al. (2012). El proceso de fabricación de azúcar. En libro “El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Editores: Mario Melgar, et al Cengicaña. Editorial Artemis Edinter, Guatemala. Pags 355-256.

Allen, R. et al. (2006). Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje serie 56. Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Roma, Italia. Pag. 323.

Andales, A, et al. (2011). Irrigation Scheduling: The Water Balance Approach. Colorado State University Extension irrigation. Site web: <http://www.etgage.com/04707.html>
Asazgua. (2017). Ingenios activos de la agroindustria azucarera de Guatemala. Consultada en página web www.azucar.com.gt/

Banguat. (2016). Estadísticas macroeconómicas de Guatemala. Consultado en la página web <https://www.banguat.gob.gt>

Canegro (2008) Canegro Sugarcane Plant Module. DSSAT v4.5. Consultada en la página web: [www.researchgate.net/publication/284409805_DSSAT_v45_-
Canegro_Sugarcane_Plant_Module_Scientific_documentation](http://www.researchgate.net/publication/284409805_DSSAT_v45_-_Canegro_Sugarcane_Plant_Module_Scientific_documentation)

Canepro. (2016). Software irrigation scheduling & meteorology. Consultado en la página web <http://www.sqrsoftware.co.za/overview-pages/canepro-estate/irrigation-scheduling/>

Castro L, O. (2003). Las cuencas hidrográficas de la zona cañera guatemalteca y su entorno. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. Cengicaña. 33p

Castro L, O. (2009). Calidad del agua para riego proveniente de pozos profundos ubicados en el estrato litoral de la zona cañera guatemalteca. Memoria de presentación de resultados 2008/2009. Pags. 207-220

Castro L, O. (2011). Crecimiento del área de riego en la zona cañera guatemalteca. Zafra 2001/2010. Presentación en PowerPoint. Cengicaña.

Castro L, O. (2012). El riego en el cultivo de caña de azúcar. En libro “El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Editores: Mario Melgar, et al Cengicaña. Editorial Artemis Edinter, Guatemala. Pags.177-201.

Castro L, O. (2013). La aplicación del riego oportuno en caña de azúcar con énfasis para los suelos con predominio de arena o arcilla en el perfil del suelo. Estrato litoral. Memoria de presentación de resultados 2012/13, Cengicaña.

Castro L, O. (2014). Análisis de la zafra 2013/2014. Presentación de resultados en Power Point. Comité de Riegos – Cengicaña.

Castro L, O. (2015). Manejo del recurso hídrico en la zona cañera Guatemalteca. Presentación PowerPoint al Comité Técnico Agrícola de Cengicaña.

Castro L, O. (2015). Las cuencas hidrográficas y su interrelación con el área cañera. Diapositiva. Area de riegos. Cengicaña.

Castro L. O. (2015). Los sistemas de riego “pivote” en la zona cañera guatemalteca. Memoria de presentación de resultados zafra 2014/15. Cengicaña.

Castro L. O. (2016). Área física sembrada de caña y su interrelación con las cuencas hidrográficas ubicadas en la zona cañera guatemalteca. Diapositiva. Presentación en PowerPoint realizada al Comité de riegos zafra 2015/2016. Cengicaña.

Cengicaña, (1996). Estudio semidetallado de suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. 2º edición. 215 pp

Cengicaña, (2002). Grupo de manejo de suelos. Informe anual 2001/2002.

Cengicaña, (2004). El balance hídrico. Herramienta para la planificación del riego en caña de azúcar. Memoria de presentación de resultados zafra 2004/2005. Pags 134-141.

Cengicaña. (2012). El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala. Melgar, M. et al editores. Guatemala 512 p.

Cenicaña. (1995). Morfología de la caña de azúcar. En el libro “El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Pp 31-62.

Cenicaña. (1995). Riegos. En el libro “El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Pp 193-210.

Cincae, Ecuador. (2009). Afinación del balance hídrico para programación de riegos en el ingenio San Carlos. Carta informativa. Año 11/No.2/agosto-dic.

Comité de riegos, (2015). Uso de fuentes de agua en la zona cañera de Guatemala zafra 2014/2015. Presentación en PowerPoint.

Comité de riegos. (2014). Evolución de los métodos de sistemas de riego. Zona cañera guatemalteco. Presentación en PowerPoint. Análisis zafra 2014/2015.

CPC. (2015). Monthly Atmospheric & SST indices. Center for weather and climate prediction. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>

Cheeroo-Nayamuth (2003). Validación de Canegro DSSAT V3.5. Disponible en (2003)https://www.researchgate.net/publication/267424859_VALIDATION_OF_CANEGRO-DSSAT_V35_FOR_CONTRASTING_SUGARCANE_VARIETIES_IN_MAURITIUS

Cruz, R. (2013). Qué es el balance hídrico. Cenicaña, Colombia. Consultado en página web: <http://www.cenicana.org/BH/>

FAO. (1986). CropWat. Irrigation water management. Consultado en la página web: <http://www.fao.org/docrep/s2022e/s2022e00.htm#Contents>

FAO. (2000). Desarrollo y realidad del riego de Guatemala. Consultado en la página web www.fao.org

FAO. (2002). Use of the Cropwat model in deficit irrigation studies. Food and agriculture organization of the united nations, FAO. Rome.

FAO. (2016). Aguastat, Área de riego en los principales productores de caña en el mundo. http://www.sugarcanecrops.com/s/agronomic_practices/irrigation_water_management/

FAO. (2016). Datos y cifras sobre riego. Consultado en la página web www.fao.org

FAO. (2016). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie riego y drenaje # 56.

Fares A. (2013). Irrigation Water Requirement Estimation Decision Support System (IWREDSS) to Estimate Crop Irrigation Requirements for Consumptive Use Permitting In Hawaii. The University of Hawaii. Department of Natural Resources and Environmental Management College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii-Manoa. Consultado en <http://files.hawaii.gov/dlnr/cwrm/publishedreports/PR201308.pdf>

Gil, S. (2015). Mapa de las Regiones de la zona cañera y las cuencas hidrográficas. ICC.

ICC. (2015). Base de datos de estaciones meteorológicas ubicadas en la zona cañera guatemalteca. Dirección web: <http://redmet.icc.org.gt/login>

IRI. (2015). ENSO forecast. International Research Institute for Climate and Society. Earth Institute/Columbia University. Consulta: <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/>

Melgar et al. (2012). Desarrollo tecnológico de la agroindustria azucarera y perspectivas. En el libro “El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Cengicaña.

Melgar M. 2010. Tendencias de la investigación en caña de azúcar a nivel mundial. Presentación en PowerPoint. XVIII Congreso de Técnicos Azucareros de Centroamérica del 5 al 8 de julio. San Salvador C.A.

Moore P. (2005). Integration of sucrose accumulation processes across hierarchical scales. *Field crops research* 92. Pp 119-135.

Neira, X. (2014). Gobernanza del agua en producción ecológica. Editor SEAE. Serie agroecología y ecología agraria. Valencia. 59 pp.

NOAA, (2015). data indices ONI. National oceanic and atmospheric administration, EE.UU. Consulta: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v4.shtml
Oswald, J. K. (2006). Automated water management for center pivot irrigation systems. Thesis Master of Science. Major in Agricultural and Biosystems Engineering. South Dakota State University.

Pardo, J. (2008). Programación del riego mediante el balance hídrico en una plantación de caña de azúcar (saccharum officinarum) en el cantón marcelino maridueña provincia del guayas. XI Congreso ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.

Pereira L. S. et al. (2,010). El riego y su tecnología. CEER (Centro de Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomía. Universidad Tecnológica de Lisboa, Portugal. 2010. Pag 204-215.

Qassim A et al. (2008). Water balance of centre pivot irrigated pasture in northern Victoria, Australia. *Agricultural Water Management*. Volumen 95, Issue 5, May 2008. Pages 566-574. Site web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377407003204>

Robles, E. (2012). El azúcar en Guatemala, su producción y exportación. Deguate. Con sultado en la página web: <http://www.deguate.com/artman/publish/produccion-guatemala/El-azucar-en-guatemala-su-produccion-y-exportacion.shtml#.VsI8WfnhAdU> .

Rogers, Danny, et al. (2003). Using Evapotranspiration Reports for Center Pivot Irrigation Scheduling. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service Manhattan, Kansas. Site web: <https://www.bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/1915.pdf>

Sanchez A. R. (2013). La importancia del riego en la agricultura. Opinión. El Universo. Disponible en <http://www.eluniverso.com/opinion/2013/12/17/nota/1928591/importancia-riego-Agricultura>.

Shelli Hays. (2,010). Center pivot irrigation revolutionizes agriculture. The Fence post. Artículo Consultado el 3 enero 2015. Disponible en <http://www.thefencepost.com/article/20100525/NEWS/100529954>

Sridhar, V. (2010). Estimation of the Water Balance Using Observed Soil Water in the Nebraska . journal of hydrologic engineering © asce / january 2010. Site web: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.608.3842&rep=rep1&type=pdf>

Subiros R. F. (2000). El cultivo de la caña de azúcar. Primera reimpresión. Editorial Universitario Estatal a distancia, San José Costa Rica.

Subiros R., F. (1995). El cultivo de la caña de azúcar. 1. Ed. San José Costa Rica. EUNED, 1995.

Tabuada A.M., Alves I.M., Russell A. (2004), Algunas bases teóricas para o dimensionado das rampas polares. Recursos Hídricos, vol 25:67-75

Tarjuelo J.M. (1999). El riego por aspersión y su Tecnología. 2ª edición revisada y ampliada. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España. Pags. 569

Tharran Garnes. (2015). Historia del Pivote. Consultado el 3 de junio 2015. Disponible en <http://tlirr.com/news-story/historia-del-pivote/?lang=es>

Thaxco (2009). El riego Mecanizado. Consultado el 1 de junio 2015. Disponible en <http://www.traxco.es/blog/pivotes-de-riego/riego-mecanizado>

Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel suelo. Consultado en página web: www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid...33612008000200002

Valin, M. I. (2006). Depivot: modelo para el diseño y evaluación de sistemas pivote de riego por aspersión. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, España.

Villatoro V. B. (2017). Grupos de manejo de suelos. Zona cañera guatemalteca. Servicio área de agricultura de precisión. Cengicaña.

Villatoro, B. et. al. (2010). Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en la zona cañera de la costa sur de Guatemala. Primera aproximación. CENGICAÑA. 325-331pp.

Villatoro, V. B. (2012). Caracterización de la zona cañera. En libro “El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Editores: Mario Melgar, et al CENGICAÑA. Editorial Artemis Edinter, Guatemala. Pags. 34-43.

Watersched Software. (2009). El balance hídrico. USGS, Science for a changing world. Australia.


Wikipedia. (2015). El pivote central. Consultado el 3 de junio 2015. Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Dispositivos_m%C3%B3viles_de_riego_por_aspersi%C3%B3n#Pivote_central



VII. ANEXOS

Anexo I

Protocolo para pruebas de uniformidad en sistemas pivote fijo. Zona cañera guatemalteca.

	UNIFORMIDAD DE RIEGO EN SISTEMAS “PIVOTE CENTRAL”	VF 001 VD 001
	METODOLOGIA DE EVALUACION	

INTRODUCCION

La uniformidad de distribución del agua, es uno de los factores importantes en la producción de caña de azúcar. Una distribución de agua inadecuada puede tener consecuencia que el cultivo no se desarrolle de la misma manera, manifestándose en el crecimiento de algunas plantas y otras con un desarrollo vegetativo exuberante en la misma parcela. Además si existe mala distribución se puede producir el anegamiento de una parte del terreno, causando asfixia de las raíces debido a aireación deficiente, la lixiviación de nutrientes, o bien la acumulación de sales nocivas en la zona radicular.

Se considera que la distribución del agua es satisfactoria si cada planta recibe el mismo volumen de agua en cada riego. Para alcanzar estos objetivos es necesario que el diseño del sistema de riego sea apropiado.

OBJETIVOS:

- Evaluar la uniformidad del riego.

METODOLOGIA:

La determinación de la uniformidad de distribución del agua consta de tres fases:

1. Medición
2. Análisis de datos
3. Presentación

MATERIALES

- Cinta métrica de 2 a 25 m.
- Número de pluviómetros de 100 a 150, diámetro mayor a 8 cm y una altura de 8 a 10 cm.
- Nivel
- Recipientes o bolsas de arroba para la medición de caudal.
- Cronómetros
- Probeta graduada(ml)
- Anemómetro
- Estacas para prueba de velocidad
- Manómetro con tubo pitot acoplado.

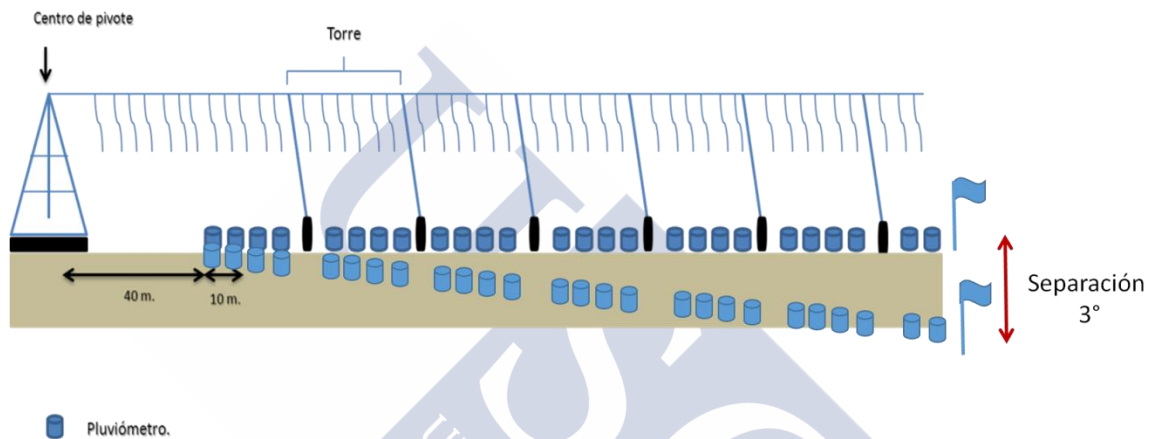
A. MEDICION

Seleccionar el área para realizar la prueba

Mediciones preliminares:

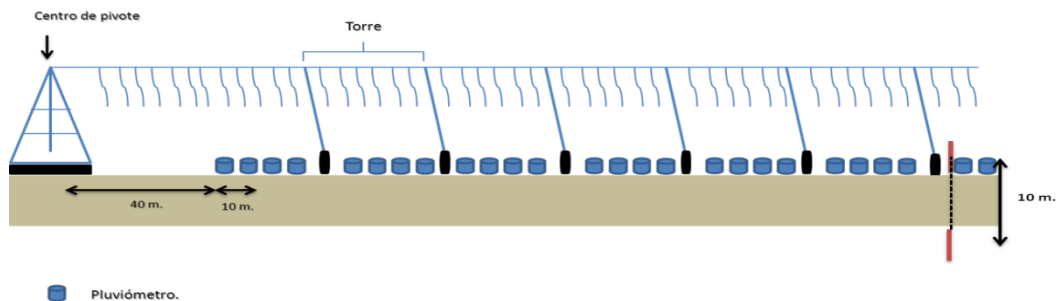
- Marca del equipo

- Medir el espaciamiento entre torre, a través de las huellas en el terreno, esté dato es necesario para conocer la longitud del sistema.
- Contar el número de torres
- Realizar las mediciones para el establecimiento de pluviómetros, la distancia recomendada entre pluviómetros es de 5 – 6.5 m.
- Se asignará un número de orden a la localización de cada pluviómetro partiendo del centro pivote.
- Los pluviómetros se enterrarán ligeramente y se deberán de colocar a nivel.
- Medir la distancia entre el centro del pivote y el primer pluviómetro, recomendación colocarlo de 30 – 40m.



Mediciones durante el riego:

- Medir la presión inicio y final del sistema
- Motor (revoluciones/min).
- Caudal de entrada al equipo
- Medir la velocidad del viento y dirección del viento, se recomienda utilizar anemómetro o en caso de no contar con el instrumento utilizar información de viento de estación meteorológica cercana, realizar esta medición cada 15 min.
- Tiempo de riego
- Prueba de velocidad desplazamiento del sistema (medir la velocidad media desplazamiento de la última torre) Según figura, se coloca una marca de inicio de donde quedo parada la llanta de la última torre, se mide diez metros y se vuelve a marcar, se toma el tiempo y se determina la velocidad en metros por minutos



- Otra manera para determinar la velocidad, es tomando en cuenta el tiempo en que se para y se desplaza la última torre, en relación a un minuto. Por ejemplo se desplaza 24 seg. este tiempo se divide entre 60, luego se multiplica por 100 y se tiene el valor de velocidad en porcentaje.
- Medir el caudal de cada torre, por la variación de diámetro de la boquilla es necesario medir la descarga de todos los emisores en un tiempo de 10 seg. O de tener caudalímetros anotar este dato.
- Medir la altura promedio de los aspersores, realizar la medición de la altura del suelo al emisor, debe de hacerse en tres emisores por torre.
- Mientras se realiza la prueba se colocarán dos pluviómetros con la cantidad de agua que se supone que recogerán los mismos, para hacer una estimación de pérdidas por evaporación.

Mediciones al final del riego:

- Medición de la pluviométrica

B. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

a) Determinación de láminas:

Para la determinación de láminas es necesario conocer el diámetro de pluviómetros. Luego de medir el volumen recolectado en el pluviómetro en ml, se determinará la lámina de riego aplicada de la siguiente manera:

$$L = (V / A) * 10$$

Dónde:

L= lámina (mm)

V= volumen del pluviómetro (ml)

A= Área de la boca del pluviómetro (cm²)

b) Determinación de uniformidad de aspersores:

Para la determinación del coeficiente de uniformidad se utilizará la ecuación de Hermann y Hein. Se basa en una medición de pluviometría dentro de un área cubierta por aspersores.

$$CUh = 100 * \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Di * \left(Ci - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Ci * Di)}{\sum_{i=1}^{i=n} Di} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} Ci * Di} \right]$$

Ecuación 1. Coeficiente de uniformidad de Hermann y Hein

Donde:

CUh = Coeficiente de Uniformidad de Hermann y Hein, en %.

n = Numero de pluviómetros.

Ci = Cantidad de agua recogida por el pluviómetro i (con i variando entre 1 y n).


Di = Superficie regada por el pluviómetro i, o distancia del centro del pivote al pluviómetro i, o también la posición ocupada por el pluviómetro i, con un valor de 1 para el más cercano al punto pivote, 2 al siguiente y así hasta un valor n para el más alejado.

LITERATURA CONSULTADA

- Tarjuelo, J. (1995). El riego por aspersión y su tecnología. 491p.
- Valero, J. (1993). Agronomía del riego. España. 732p.
- Valín, M.I. (2005). Depivot: modelo para el diseño y evaluación de sistemas pivote de riego por aspersión. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.


ANEXOS

1. INFORMACION GENERAL DE PIVOTE Y DETERMINACION DE VELOCIDAD

	EVALUACION DE SISTEMAS DE RIEGO PIVOTE CENTRAL EN CAÑA DE AZUCAR BOLETA DE CAMPO		VF _01 B-ESRPC
			FECHA:
			HOJA 1/3

Información General						Localización (Coordenadas geograficas)			
Ingenio		Lote (s)		Estado Fenológico		Latitud		Longitud	
Finca		Cultivo		Prof. Radicular(cms)		Altitud(msnm)			
Colaborador(es):						Responsable			
CARACTERIZACIÓN DEL SUELO					PROGRAMACION DE SUELO				
Propiedades	A 20 cm	A 40 cm	A 60 cm	Datos					
Textura				Frecuencia(días)		Duración(Hrs)		Lámina neta(mm)	
LAA(mm/m)				DPM(%)		Eficiencia(%)		Lámina bruta(mm)	
CARACTERIZACION DEL SISTEMA									
Marca		Tipo de funcionamiento		Material		No. Tramos		Disponibilidad de cañón	
Tramo	Longitud(m)	# Aspersores	Marca		Tramo	Longitud(m)	# Aspersores	Marca	
1					8				
2					9				
3					10				
4					11				
5					12				
6					13				
7					14				
Características del aspersor cañón									
Marca		Modelo		Dia. Boquilla(mm)		Presión(PSI)		Alcance(m)	
Características de la bomba									
Marca		Modelo		RPM		Caudal (GPM)			
Esquema de Disposición de pluviómetros									
Distancia del primer pluviometro al centro pivote (m)					Diámetro de pluviómetros (cm)				
Tramo	No. Pluviómetros					Tramo	No. Pluviómetros		
1						8			
2						9			
3						10			
4						11			
5						12			
6						13			
7						14			
Determinación de la velocidad del sistema									
Prueba		1	2	3	4	5	6	Promedio	
Velocidad lineal	Tiempo(seg)								
	Distancia (m)								
	Velocidad (m/seg)								
Velocidad Porcentual	Andar (seg)								
	Parado(seg)								
	Velocidad(%)								

2. BOLETA PARA LA DETERMINACION DE LA PRESION Y CAUDAL Y REGISTRO DE DATOS METEOROLOGICOS

	EVALUACION DE SISTEMAS DE RIEGO PIVOTE CENTRAL EN CAÑA DE AZUCAR BOLETA DE CAMPO	VF_01B-ESRPC
		FECHA:
		HOJA: 2/3


PRESION Y CAUDAL EN EL LATERAL								
Medición presión		Tramo 1/3			Tramo 2/3		Tramo final	
Tramo	Presión(PSI)	No.	Volumen(lts)	Tiempo	Volumen(lts)	Tiempo	Volumen(lts)	Tiempo
1/3		1						
2/3		2						
final		3						

Duración de la evaluación	Hora Inicio		Hora final		Tiempo (hrs)			
Anchura mojada(m)				Tiempo encharcamiento(min)	Tramo Inicio		Tramo final	
Perdidas por evaporación	No.	vol. Inicial (mm)	vol. Final (mm)	Evaporación (mm)	No.	vol. Inicial (mm)	vol. Final (mm)	Evaporación (mm)
	1				3			
	2				4			

Datos Meteorológicos	Lecturas a cada 15 minutos							
Variables	Inicio	15	30	45	60	75	90	Final
Vel. Viento (m/s)								
Dirección del viento								
Humedad relativa (%)								
Temperatura (°C)								

OBSERVACIONES

3. BOLETA PARA RECOLECTAR DATOS DE PLUVIOMETRIA


	EVALUACION DE SISTEMAS DE RIEGO PIVOTE CENTRAL EN CAÑA DE AZUCAR BOLETA DE CAMPO	VF_01 B-ESRPC FECHA: HOJA: 3/3
---	--	--------------------------------------

VOLUMEN RECOGIDO POR PLUVIOMETROS

No.	Torre	Vol. (mm)		No.	Torre	Vol. (mm)		No.	Torre	Vol. (mm)
1				31				61		
2				32				62		
3				33				63		
4				34				64		
5				35				65		
6				36				66		
7				37				67		
8				38				68		
9				39				69		
10				40				70		
11				41				71		
12				42				72		
13				43				73		
14				44				74		
15				45				75		
16				46				76		
17				47				77		
18				48				78		
19				49				79		
20				50				80		
21				51				81		
22				52				82		
23				53				83		
24				54				84		
25				55				85		
26				56				86		
27				57				87		
28				58				88		
29				59				89		
30				60				90		

OBSERVACIONES

4. PRUEBA DE ASPERORES CON Y SIN REGULADOR DE PRESION

	EVALUACION DE SISTEMAS DE RIEGO PIVOTE CENTRAL EN CAÑA DE AZUCAR BOLETA DE CAMPO	VF_01 B-ESRPC FECHA: HOJA: ANEXO
---	---	--

PRESION Y CAUDAL EN EL LATERAL									
Medición presión		Aspersores		Aspersor 1		Aspersor 2		Aspersor 3	
Tramo	Presión(PSI)	Sin regulador	Con regulador	Volumen(lts)	Altura (m)	Volumen(lts)	Altura (m)	Volumen(lts)	Altura (m)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									

OBSERVACIONES

ANEXO II

**PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE EVALUACIONES DE
UNIFORMIDAD DE RIEGO EN SISTEMAS DE RIEGO “PIVOTE
CENTRAL”. INGENIO MADRE TIERRA. 2014**



EVALUACION DE UNIFORMIDAD DE RIEGO SISTEMA DE RIEGO PIVOTE CENTRAL



ZAFRA 2014/15



CENTRO INTERNACIONAL DE ESTUDIOS
DE DOUTORAMENTO E AVANZADOS
DA USC (CIEDUS)



2

METODOLOGIA DE EVALUACION

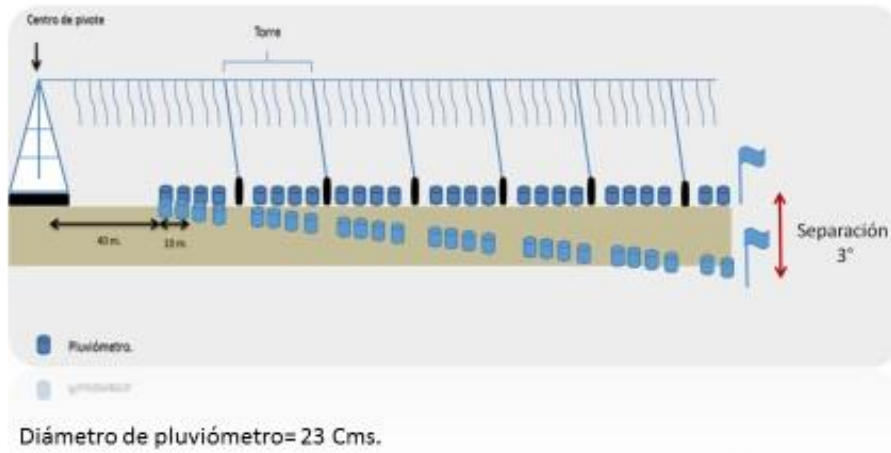
Mediciones preliminares:

- Marca del equipo
- Medir el espaciamiento entre torre, a través de las huellas en el terreno, esté dato es necesario para conocer la longitud del sistema.
- Contar el número de torres
- Realizar las mediciones para el establecimiento de pluviómetros, la distancia recomendada entre pluviómetros es de 5 - 6.5 m.
- Se asignará un número de orden a la localización de cada pluviómetro partiendo del centro pivote.
- Los pluviómetros se enterrarán ligeramente y se deberán de colocar a nivel.
- Medir la distancia entre el centro del pivote y el primer pluviómetro, recomendación colocarlo de 30 - 40m.



3

Ubicación de pluviómetros, distribuidos longitudinalmente en todo el sistema



4

METODOLOGIA DE EVALUACION

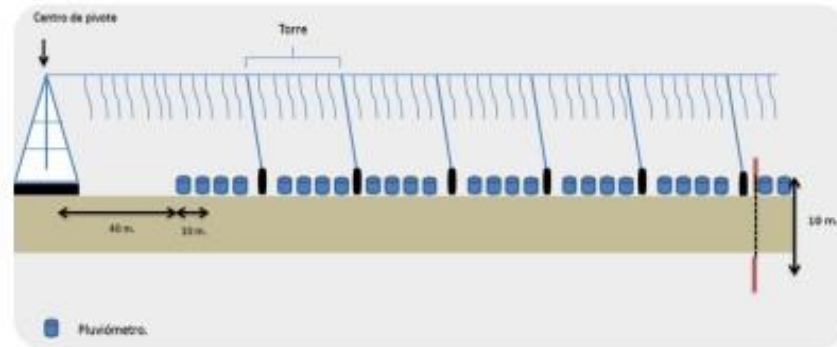
Durante la evaluación:

- Medir la presión inicio y final del sistema
- Motor (revoluciones/min).
- Caudal de entrada al equipo
- Medir la velocidad del viento y dirección del viento,.
- Tiempo de riego
- Prueba de velocidad desplazamiento del sistema



5

METODOLOGIA DE EVALUACION



Finalización de la evaluación:

- Medir la pluviometría



6

ANALISIS DE LA INFORMACIÓN

$$L = (V / A) * 10$$

Determinación de láminas

Dónde:
 L= lámina (mm)
 V= volumen del pluviómetro (ml)
 A= Área de la boca del pluviómetro (cm²)

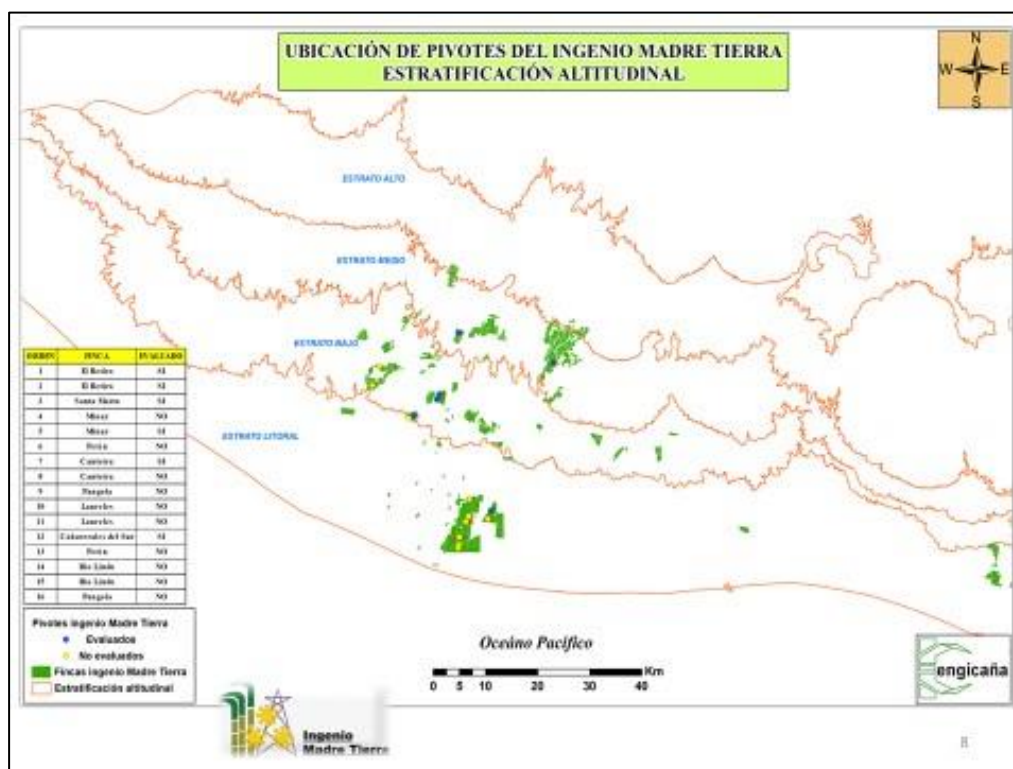
$$CUH = 100 * \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i * \left(CI - \frac{\sum_{i=1}^n (CI * D_i)}{\sum_{i=1}^n D_i} \right)}{\sum_{i=1}^n CI * D_i} \right]$$

Determinación de coeficiente de uniformidad de uniformidad

Dónde:
 CUH = Coeficiente de Uniformidad de Hermann y Hein, en %.
 n = Numero de pluviómetros.
 CI = Cantidad de agua recogida por el pluviómetro i (con i variando entre 1 y n).
 Di = Superficie regada por el pluviómetro i, o distancia del centro del pivote al pluviómetro i, o también la posición ocupada por el pluviómetro i, con un valor de 1 para el más cercano al punto pivote, 2 al siguiente y así hasta un valor n para el más alejado.



7

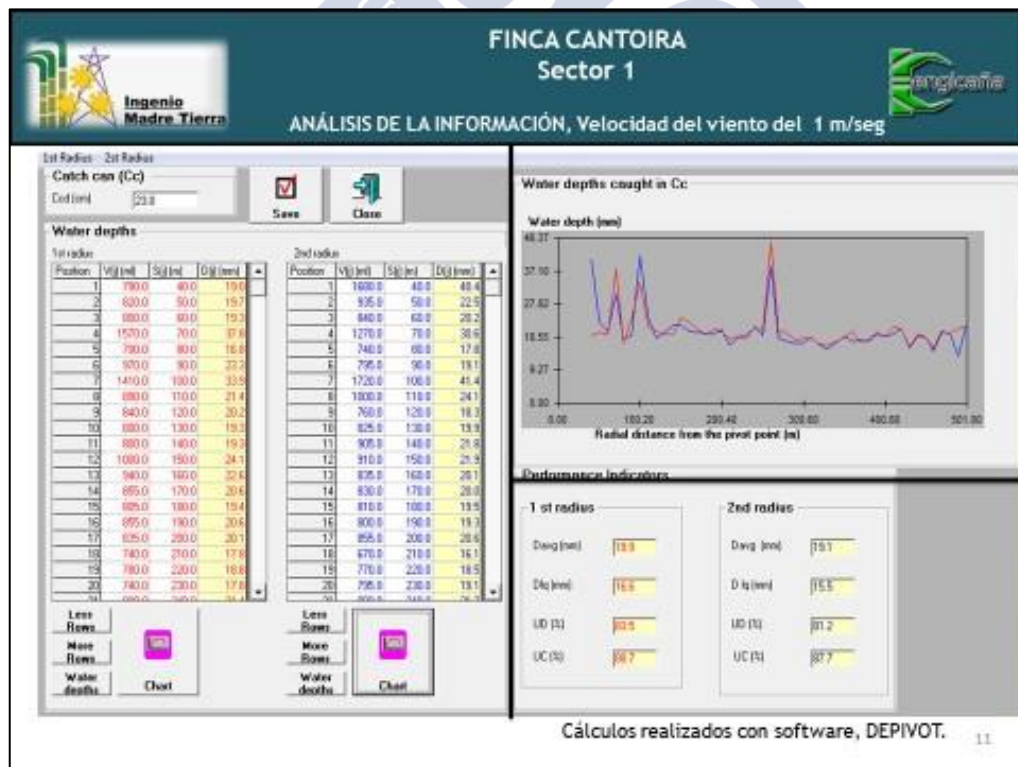
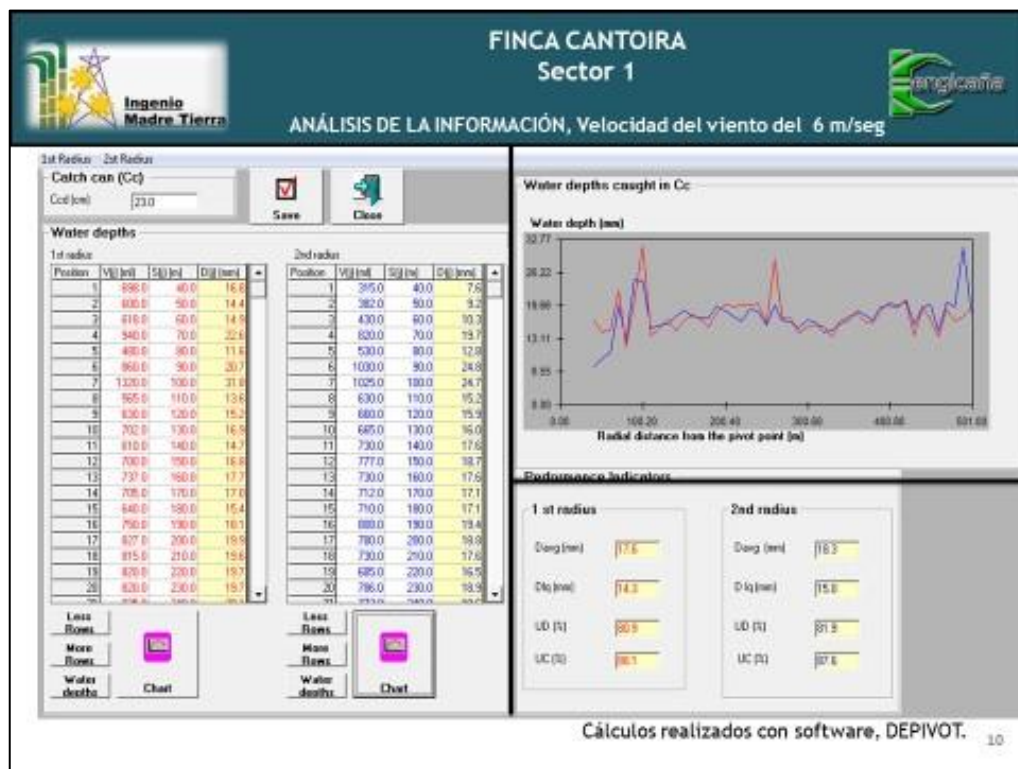


FINCA CANTOIRA
Sector 1

RECOPIACION DATOS DE CAMPO

<p style="text-align: center;">Sistema</p> <p>Funcionamiento: Electrónico No. Torres: 09+ Voladizo Fecha de evaluación: 08/Ene/2015</p>	<p style="text-align: center;">Programación:</p> <p>Lámina requerida: 20 mm Velocidad : 18% Frecuencia de riego: 6 días.</p>
<p style="text-align: center;">Ubicación de la evaluación dentro del sistema</p>	<p style="text-align: center;">Disposición de pluviómetros en campo</p>
<p style="text-align: center;">Operación del sistema</p>	

9



FINCA EL MINAR

RECOPIACION DATOS DE CAMPO

Sistema

Funcionamiento: Electrónico
No. Torres: 09+ Voladizo
Fecha de evaluación: 13/Ene/2015

Programación:

Lámina requerida: 10 mm
Velocidad : 36%
Frecuencia de riego: 2 días.

Ubicación de la evaluación dentro del sistema

Disposición de pluviómetros en campo

Operación del sistema

12

FINCA EL MINAR

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

1st Radius 2nd Radius

Catch can (Cc) Save Close

Water depths

1st radius				2nd radius			
Position	Vd (mm)	Sd (mm)	Cd (mm)	Position	Vd (mm)	Sd (mm)	Cd (mm)
1	350.0	40.0	9.4	1	410.0	40.0	9.9
2	190.0	50.0	4.6	2	250.0	50.0	6.0
3	350.0	60.0	9.4	3	360.0	60.0	6.7
4	340.0	70.0	8.2	4	380.0	70.0	9.1
5	360.0	80.0	8.7	5	440.0	80.0	10.0
6	340.0	90.0	8.2	6	790.0	90.0	19.0
7	560.0	100.0	13.5	7	530.0	100.0	12.8
8	1200.0	110.0	28.5	8	1430.0	110.0	30.7
9	330.0	120.0	7.9	9	430.0	120.0	9.4
10	320.0	130.0	7.7	10	350.0	130.0	8.4
11	540.0	140.0	13.0	11	540.0	140.0	13.0
12	440.0	150.0	10.6	12	410.0	150.0	9.9
13	950.0	160.0	23.2	13	500.0	160.0	12.0
14	430.0	170.0	10.3	14	380.0	170.0	8.7
15	390.0	180.0	9.4	15	430.0	180.0	9.6
16	420.0	190.0	10.1	16	450.0	190.0	10.8
17	540.0	200.0	13.0	17	440.0	200.0	10.4
18	430.0	210.0	10.3	18	590.0	210.0	14.2
19	400.0	220.0	9.4	19	320.0	220.0	7.7
20	330.0	230.0	7.9	20	480.0	230.0	11.5

Less Rows More Rows Water depths Chart

Less Rows More Rows Water depths Chart

Water depths caught in Cc

Water depth (mm)


Radial distance from the pivot point (m)

Performance indicators

<p>1st radius</p> <p>Davg (mm) 5.6</p> <p>D1q (mm) 6.9</p> <p>UD (%) 75.1</p> <p>UC (%) 80.7</p>	<p>2nd radius</p> <p>Davg (mm) 8.5</p> <p>D1q (mm) 6.5</p> <p>UD (%) 87.5</p> <p>UC (%) 92.2</p>
---	---

Cálculos realizados con software, DEPIVOT.

13



FINCA EL RETIRO PIVOTE NORTE

RECOPILACION DATOS DE CAMPO



Sistema

Funcionamiento: Electrónico
No. Torres: 08+ Voladizo
Fecha de evaluación: 14/Ene/2015


Programación:

Lámina requerida: 10 mm
Velocidad : 32%
Frecuencia de riego: 2 días.


Ubicación de la evaluación dentro del sistema




Disposición de pluviómetros en campo



Operación del sistema




14



FINCA RETIRO PIVOTE NORTE

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN



1st Radius - 2nd Radius

Catch can (Cc)
Cod (m): 23.0

Save Close

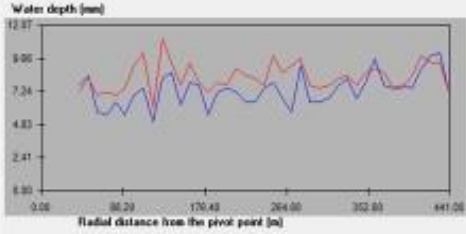
Water depths

1st radius				2nd radius			
Position	Vd (mm)	Sd (mm)	Dd (mm)	Position	Vd (mm)	Sd (mm)	Dd (mm)
1	300.0	40.0	7.2	1	320.0	40.0	7.7
2	343.0	50.0	8.2	2	350.0	50.0	8.4
3	290.0	60.0	7.0	3	240.0	60.0	5.8
4	300.0	70.0	7.2	4	230.0	70.0	5.5
5	290.0	80.0	7.0	5	270.0	80.0	6.5
6	310.0	90.0	7.5	6	230.0	90.0	5.5
7	300.0	100.0	9.1	7	280.0	100.0	7.0
8	420.0	110.0	10.1	8	310.0	110.0	7.5
9	250.0	120.0	6.0	9	210.0	120.0	5.1
10	460.0	130.0	11.1	10	340.0	130.0	8.2
11	290.0	140.0	9.4	11	360.0	140.0	8.7
12	320.0	150.0	7.7	12	260.0	150.0	6.3
13	290.0	160.0	9.4	13	330.0	160.0	7.5
14	330.0	170.0	7.5	14	320.0	170.0	7.2
15	300.0	180.0	7.2	15	230.0	180.0	5.5
16	330.0	190.0	7.5	16	300.0	190.0	7.2
17	320.0	200.0	7.7	17	310.0	200.0	7.5
18	370.0	210.0	9.5	18	300.0	210.0	7.2
19	350.0	220.0	9.4	19	270.0	220.0	6.5
20	340.0	230.0	8.2	20	270.0	230.0	6.5
21	370.0	240.0	9.2	21	280.0	240.0	7.2

Less Flow More Flow Water depths Chart

Less Flow More Flow Water depths Chart

Water depths caught in Cc



Radial distance from the pivot point (m)

Performance Indicators

1st radius		2nd radius	
Davg (mm)	6.4	Davg (mm)	7.6
Dd (mm)	7.3	Dd (mm)	6.2
UD (%)	88.3	UD (%)	85.3
UC (%)	88.8	UC (%)	88.8

15

Cálculos realizados con software, DEPIVOT.

FINCA CAÑADERALES DEL SUR
 RECOPIACION DATOS DE CAMPO

Sistema

Funcionamiento: Hidráulico
 No. Torres: 09+ Voladizo
 Fecha de evaluación: 20/Ene/2015

Programación:

Lámina requerida: 10 mm
 Velocidad : 0.912 m/min
 Frecuencia de riego: 2 días.

Ubicación de la evaluación dentro del sistema

Disposición de pluviómetros en campo

Operación del sistema

16

FINCA CAÑADERALES DEL SUR
 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

1st Radius - 2nd Radius

Catch can (Cc) Save Close

Water depths

1st radius				2nd radius			
Position	W (mm)	S (mm)	D (mm)	Position	W (mm)	S (mm)	D (mm)
1	270.0	40.0	0.5	1	250.0	40.0	0.4
2	460.0	90.0	11.1	2	520.0	50.0	15.6
3	470.0	90.0	11.3	3	520.0	40.0	12.5
4	340.0	70.0	8.2	4	550.0	70.0	13.2
5	610.0	80.0	14.7	5	580.0	80.0	14.2
6	360.0	90.0	6.7	6	210.0	90.0	7.5
7	420.0	100.0	10.1	7	630.0	100.0	15.2
8	510.0	110.0	12.3	8	530.0	110.0	12.8
9	550.0	120.0	13.2	9	580.0	120.0	14.2
10	510.0	130.0	12.3	10	540.0	130.0	13.0
11	450.0	140.0	10.8	11	530.0	140.0	12.8
12	460.0	150.0	11.1	12	470.0	150.0	11.3
13	460.0	160.0	9.6	13	540.0	160.0	13.0
14	450.0	170.0	11.6	14	590.0	170.0	14.2
15	550.0	180.0	13.2	15	530.0	180.0	12.8
16	430.0	190.0	11.8	16	510.0	190.0	12.3
17	520.0	200.0	12.5	17	700.0	200.0	16.8
18	600.0	210.0	14.4	18	630.0	210.0	15.2
19	330.0	220.0	7.5	19	570.0	220.0	13.7
20	400.0	230.0	11.6	20	700.0	230.0	16.0
21	240.0	240.0	12.4	21	800.0	240.0	23.3

Less Rows

More Rows

Water depths

Chart

Less Rows

More Rows

Water depths

Chart

Water depths caught in Cc

Water depth (mm)

Radial distance from the pivot point (m)

Performance indicators

1st radius

Davg (mm)

Dsq (mm)

UD (%)

UC (%)

2nd radius

Davg (mm)

Dsq (mm)

UD (%)

UC (%)

Cálculos realizados con software, DEPIVOT.

17



**FINCA RETIRO
PIVOTE SUR**



RECOPIACION DATOS DE CAMPO

Sistema

Funcionamiento: Electrónico
No. Torres: 09+ Voladizo
Fecha de evaluación: 20/Feb/2015

Programación:

Lámina requerida: 10 mm
Velocidad : 35 %
Frecuencia de riego: 2 días.

Ubicación de la evaluación dentro del sistema




Disposición de pluviómetros en campo




Operación del sistema





**FINCA RETIRO
PIVOTE SUR**



ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

1st Radius 2nd Radius

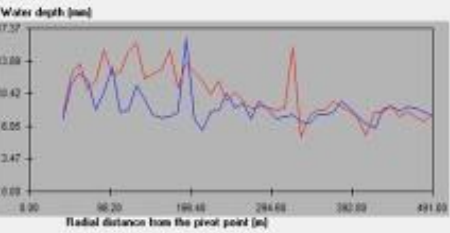
Catch can (Cc) ☒ Save

Water depths

Position	Vij (m)	Sij (m)	Dij (mm)
1	350.0	40.0	8.4
2	520.0	50.0	12.5
3	570.0	60.0	13.7
4	490.0	70.0	11.8
5	490.0	80.0	11.8
6	620.0	90.0	15.2
7	520.0	100.0	12.5
8	530.0	110.0	12.9
9	620.0	120.0	14.9
10	660.0	130.0	15.9
11	500.0	140.0	12.0
12	520.0	150.0	12.5
13	540.0	160.0	13.0
14	630.0	170.0	15.2
15	480.0	180.0	11.1
16	570.0	190.0	12.7
17	530.0	200.0	12.5
18	480.0	210.0	11.8
19	620.0	220.0	15.2
20	490.0	230.0	11.8

Less Rows More Rows Water depths

Water depths caught in Cc



Performance indicators

1st radius		2nd radius	
Davg (mm)	8.8	Davg (mm)	8.8
Dij (mm)	7.3	Dij (mm)	7.3
UD (%)	75.9	UD (%)	84.9
UC (%)	81.5	UC (%)	89.9

Less Rows More Rows Water depths

19

Cálculos realizados con software, DEPIVOT.



FINCA SANTA MARTA

RECOPIACION DATOS DE CAMPO



Sistema

Funcionamiento: Electrónico
 No. Torres: 09+ Voladizo
 Fecha de evaluación: 06/Mar/2015

Programación:

Lámina requerida: 10 mm
 Velocidad : 32 %
 Frecuencia de riego: 2 días.

Ubicación de la evaluación dentro del sistema



Disposición de pluviómetros en campo



Operación del sistema





FINCA SANTA MARTA

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN



1st Radius 2nd Radius

Catch can (Cc) Save Clear

Water depths

1st radius				2nd radius			
Position	Vg (mm)	D (mm)	Dg (mm)	Position	Vg (mm)	D (mm)	Dg (mm)
1	360.0	40.0	8.7	1	380.0	48.0	8.7
2	540.0	50.0	11.0	2	470.0	50.0	11.0
3	780.0	60.0	7.0	3	380.0	68.0	7.0
4	380.0	70.0	9.1	4	380.0	78.0	9.1
5	340.0	80.0	8.2	5	380.0	88.0	8.2
6	450.0	90.0	10.0	6	480.0	90.0	11.6
7	370.0	100.0	8.9	7	420.0	100.0	10.1
8	370.0	110.0	8.9	8	390.0	110.0	9.4
9	400.0	120.0	9.0	9	410.0	120.0	9.8
10	360.0	130.0	9.7	10	410.0	130.0	9.9
11	400.0	140.0	9.6	11	430.0	140.0	10.0
12	400.0	150.0	9.6	12	410.0	150.0	9.8
13	410.0	160.0	9.9	13	390.0	160.0	9.4
14	380.0	170.0	8.6	14	380.0	170.0	8.4
15	150.0	180.0	3.0	15	180.0	180.0	4.3
16	250.0	190.0	6.0	16	290.0	190.0	7.0
17	410.0	200.0	9.9	17	410.0	200.0	9.9
18	350.0	210.0	8.4	18	380.0	210.0	9.1
19	300.0	220.0	7.2	19	310.0	220.0	7.9
20	330.0	230.0	7.9	20	330.0	230.0	7.9

Less More Water depths Chart

Water depths caught in Cc



Performance indicators

1st radius		2nd radius	
Davg (mm)	8.3	Davg (mm)	9.0
D1q (mm)	8.7	D1q (mm)	7.9
UD (%)	98.1	UD (%)	97.3
UC (%)	98.8	UC (%)	98.5

Cálculos realizados con software, DEPIVOT.

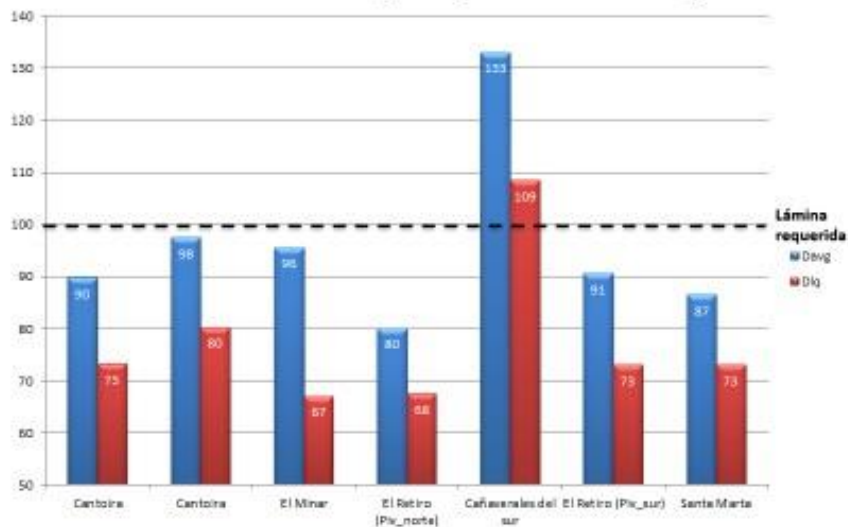
RESULTADOS DE LAS EVALUACIONES

EVALUACION DE SISTEMA DE REGO - PIVOTE CENTRAL - TEMPORADA 2014/2015															
NO.	Fecha de Evaluación	Finca	Lámina requerida (mm)	1er. Radio				2do. Radio				Promedio			
				Davg (mm)	Dlq (mm)	UD (%)	CU(%)	Davg (mm)	Dlq (mm)	UD (%)	CU(%)	Davg (mm)	Dlq (mm)	UD (%)	CU(%)
1	08/01/2015	Cantora	20	17.6	14.3	80.9	88.1	18.3	15.0	81.9	87.6	18.0	14.7	81.4	87.9
2	09/01/2015	Cantora	20	19.9	16.6	83.5	88.7	19.1	15.5	81.2	87.7	19.5	16.1	82.4	88.2
3	13/01/2015	El Mirar	10	9.6	6.9	71.1	83.7	9.5	6.5	67.9	82.2	9.6	6.7	69.5	83.0
4	14/01/2015	El Retiro (Piv. norte)	10	8.4	7.3	86.8	90.8	7.6	6.2	81.3	86.0	8.0	6.8	84.1	89.4
5	20/01/2015	Cañaverales del sur	10	13.2	10.5	79.6	87.5	13.4	11.2	83.3	89.8	13.3	10.9	81.5	88.7
6	20/02/2015	El Retiro (Piv. sur)	10	9.5	7.3	76.9	81.5	8.6	7.3	84.9	89.9	9.1	7.5	80.9	85.7
7	06/03/2015	Santa Marta	10	8.3	6.7	80.1	88.8	9.0	7.9	87.1	92.5	8.7	7.5	85.6	90.7



22

Análisis de lámina media aplicada y lámina del 25% más bajo.



23



Otto René Castro Loarca
ocastro@cengicana.org



Anexo III

**Presentación del software Cengiriegos.
Cengicaña, 8 de Junio 2016**





Foto: pivote fijo, Finca El Retiro, M.T. Tomada por O.R. Castro, Abr 2015

HERRAMIENTA WEB ESPECIALIZADA EN RIEGOS

Otto René Castro Loarca (administrador)
Héctor Monterroso (administrador)
Área de riegos, CENGICAÑA
08 junio 2016

USC CENTRO INTERNACIONAL DE ESTUDIOS DE DOCTORADO E AVANZADOS DA USC (CIEDUS)

CENGICAÑA

¿QUÉ ES engRiegos ?

**HERRAMIENTA WEB ESPECIALIZADA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL AGUA A NIVEL DE LOTE CON FINES DE RIEGO
VERSIÓN I**

engRiegos es una serie de módulos web, elaborada por el área de riegos de CENGICAÑA. Los módulos en esta primera versión son:

1. El uso del Balance Hídrico en el suelo (BH-CENGI-MT) con fines de planificación y seguimiento del riego en tiempo real, según estrato altitudinal, época de corte, tipo de suelo, etapa fenológica y operación del sistema de riego, ya sea estacionario o de desplazamiento.
2. El uso del balance energético con fines de estimación de producción.
3. El uso de la demanda climática (ETo) con fines de estimación del consumo de agua en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar.

¿CÓMO OPERA ?

- CENGIRIEGOS, utiliza **toda las bases de datos** siguientes:
 - Productividad por lote, estaciones meteorológicas que administra el ICC (21 estaciones), base de datos de análisis físico obtenida a nivel de laboratorio.
- La **dinámica de operación** de CENGIRIEGOS la realizará un administrador (área de riegos) el cual determinará los usuarios y permisos para el manejo de los módulos, con el aval del comité de riegos y/o profesional que asigne el ingenio. El administrador será responsable de generar nuevas versiones y/o módulos, si así, se requiere, o se solicite.
- La información que genere el usuario, **no será compartida**, a menos, que él otorgue el permiso.
- CENGIRIEGOS, **generará información diaria por lote en tiempo real**: 1. De la operación del riego planificada por el usuario según sistema de riego. 2. De la operación sugerida (requerimiento real) con base al comportamiento de las variables de la relación: **Agua-Suelo-Caña de azúcar-Atmósfera-Operación**. 3. Del comportamiento de la Radiación global, base para el balance energético. 4. Del comportamiento de la demanda climática (ETo-penman monteith)

5

¿Que información requiere ?

- En esta versión 1, la información requerida se basa en los siguientes componentes:



6

Bondades de

No llegará a ser obsoleto, debido a:

- Que el comportamiento del clima es muy dinámico y la información requerida de las variables climáticas difieren en el tiempo y espacio en cada ciclo de cultivo de la zona cañera de Guatemala.
- Que los resultados que se generen de las investigaciones específicas por sitio o lote como: mejoras en el suelo, aporte capilar, nuevas respuestas de la caña al agua según variedad y nuevos sistemas más eficientes en el uso del agua, pueden reemplazar la información existente.
- Que las respuestas encontradas en cada ciclo generará nuevas oportunidades de mejora del Software para crear nuevos módulos y/o versiones.

7

Al aplicar

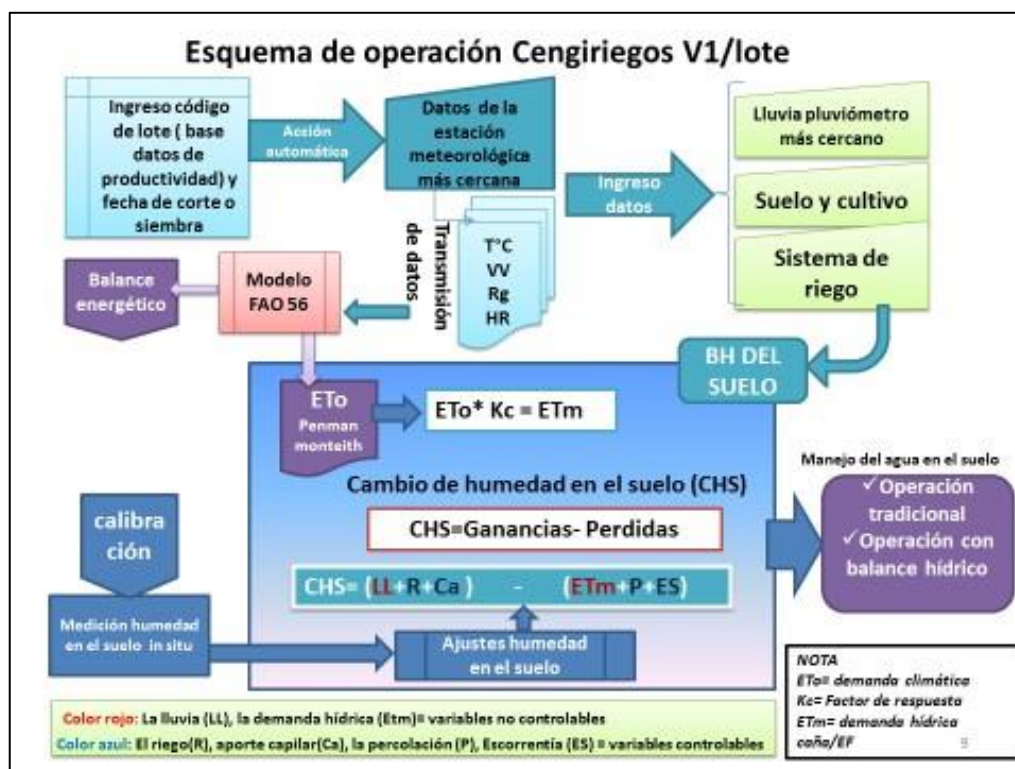
¿Qué debilidades que se deben de convertir en fortaleza?

Debilidades

- Los sistemas de riego que operan con eficiencias de uniformidades < 80 por ciento.
- Muestreos (muestras de suelos para análisis físico) de lotes en sitios no representativos.
- Utilización de información de lluvia de un pluviómetro que se encuentre muy distante del sistema de riego.
- El pluviómetro utilizado no reúne los estándares de calidad, emitidos por la OMM.
- No generar información en sitios donde existen problemas de drenaje y/o aguas de mala calidad.
- No aprovechar las bondades de los suelos de cada lote en cuanto aportes: capilar, aumento de la humedad por residuos de cosecha y/o aplicación de cachaza.
- Se extrapolan los buenos resultados a otros ambientes de suelo y clima diferentes.
- No se actualiza la base de datos de productividad en un tiempo menor a tres meses.


FORTALEZAS

8



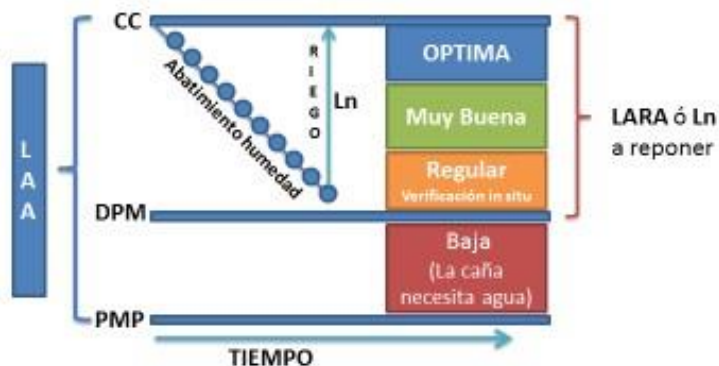
IMPORTANCIA DEL BALANCE HÍDRICO EN EL SUELO

Con el **balance hídrico** se trata de que el agua en el suelo, no sea el factor determinante en cada una de las fases fenológicas de la producción de la caña de azúcar (tanto déficit como exceso).

Con la planificación del riego a través del balance hídrico en el suelo se evita que el agua se desperdicie por escurrimiento o percolación o que su exceso sea perjudicial al cultivo.

FUNCIONAMIENTO DE ALARMA EN EL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO

Acción normal (sin ajustes)

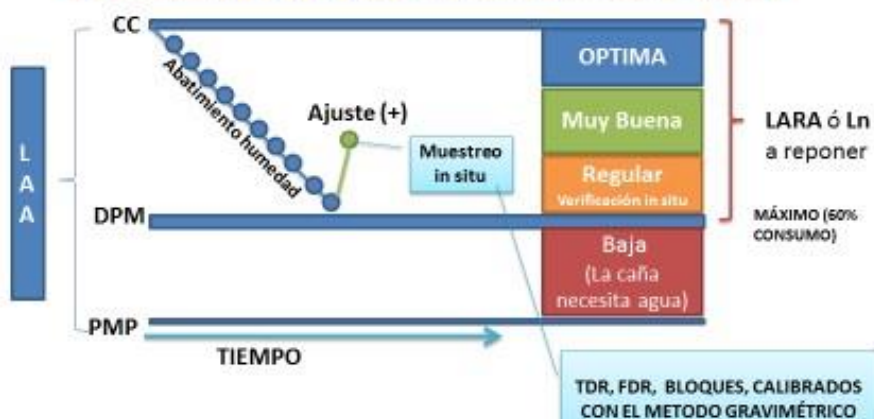


11

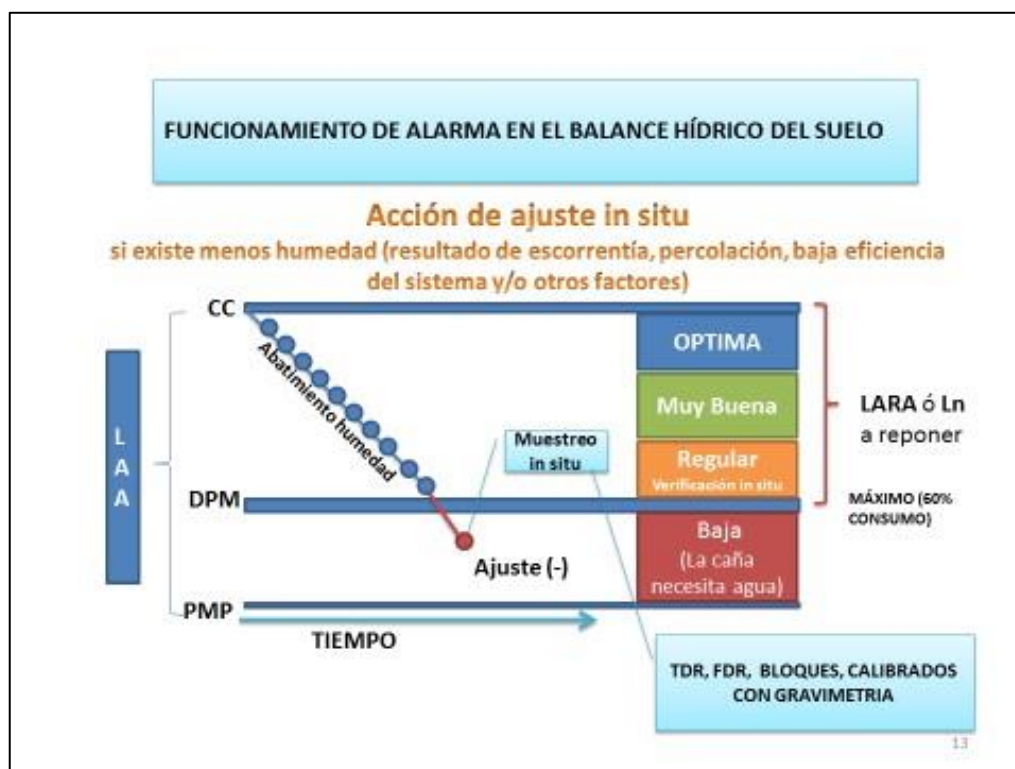
FUNCIONAMIENTO DE ALARMA EN EL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO

Acción de ajuste in situ

si existe más humedad (por aporte capilar, mulch, otras mejoras en el suelo, así también por escorrentía (Es) o por flujo subsuperficial desde áreas cercanas)



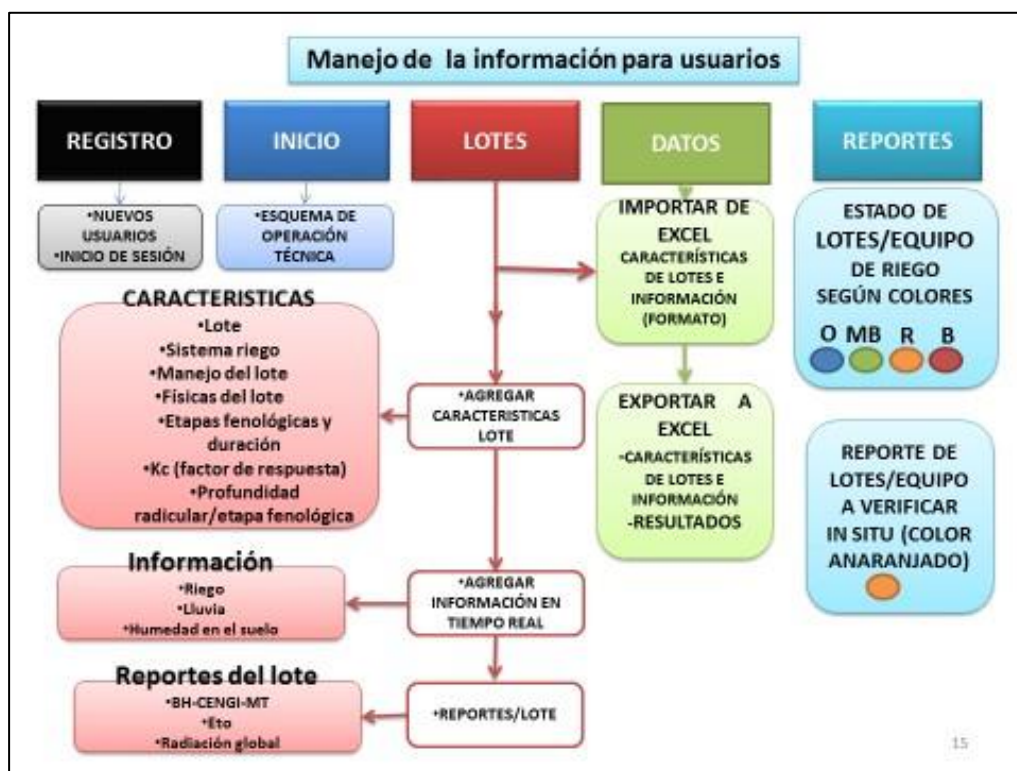
12



HERRAMIENTA WEB ESPECIALIZADA EN RIEGOS

CARACTERÍSTICAS DE





HERRAMIENTA WEB ESPECIALIZADA EN RIEGOS

ESTRATEGIAS PARA EL MANEJO DE



17



NUEVOS MODULOS PARA LAS SIGUIENTES VERSIONES DE CENGIRIEGOS

- Evaluación y mejora de la calidad del riego.
- Evaluación financiera de proyectos de riego.
- Otros herramientas de interés:
 - Uso de índices de vegetación de imágenes satelitales con fines de riego.
 - Diseño de canales y/o estructuras de conservación de suelos

19

MANEJO DEL SOFTWARE

Agradecimiento especial al equipo técnico de la empresa
"COMPUSSERVICE" en la elaboración del Software



CENTRO INTERNACIONAL DE ESTUDIOS
DE DOUTORAMIENTO E AVANZADOS
DA USC (CIEDUS)



20

MODELO DE DEFINICIÓN DE LA DEMANDA CLIMÁTICA

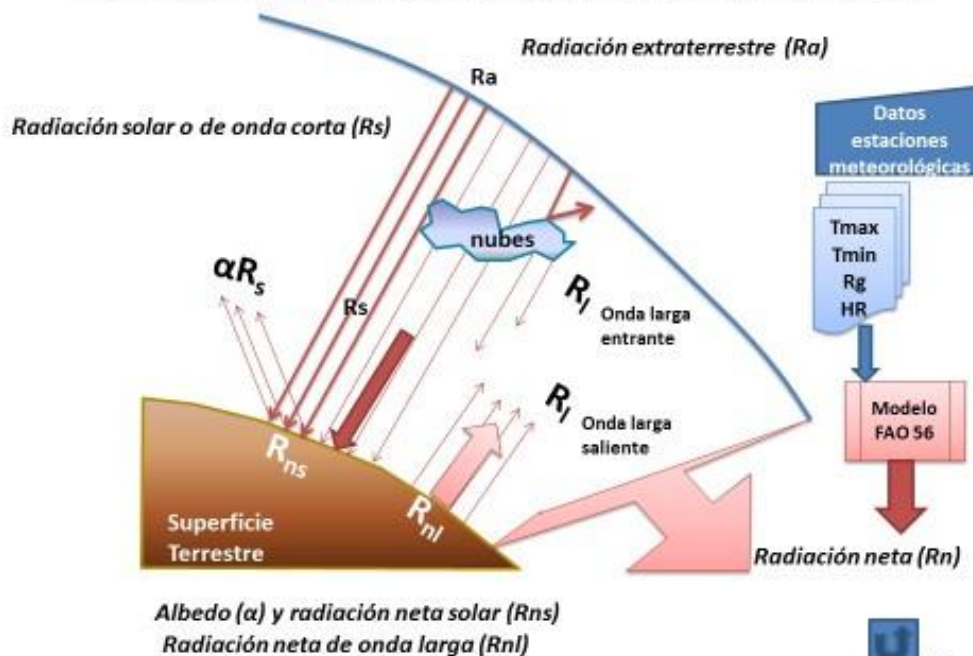
($ETo_{penman-monteith}$)

$$ETo = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

ETo	evapotranspiración de referencia (mm día ⁻¹)
R_n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
R_s	radiación extraterrestre (mm día ⁻¹)
G	flujo de calor del suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
U_2	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e_s	presión de vapor de saturación (kPa)
e_a	presión real de vapor (kPa)
$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

21

MODELO GRAFICO DEL BALANCE ENERGÉTICO



22

